



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Storm tracks along the North Western Mediterranean

Treball realitzat per:

**Javier Sol Jareño**

Dirigit per:

**Vicente Gracia Garcia**

**Manuel García León**

**Jue Lin-Ye**

**Dorleta Orue Echevarria Iglesias**

Grau en:

**Enginyeria Civil**

Barcelona, 23 de setembre de 2016

Departament d'Enginyeria Marítima

**TREBALL FINAL DE GRAU**



# ÍNDIX

---

	Pàgina
1. Introducció	2
1.1 Motivació	2
1.2 Tempesta: definició i problemàtica	3
1.3 Conseqüències de les tempestes	4
1.4 Objectiu	5
1.5 Esquema del treball	5
2. Estat del coneixement	8
2.1 Trajectòries	8
2.1.1 Tempestes i ciclons a l'Atlàntic Nord	8
2.1.2 Ciclons a la regió mediterrània	10
2.2 Algoritmes de seguiment de tempestes	12
2.2.1 L'experiment ECHAM4	12
2.2.2 ERA-40 i NCEP/NCEAR	14
2.3 Modelització d'ones: SWAN/WAM	17
2.3.1 Modelització d'altura d'ona	19
2.3.2 Inputs de vents	19
2.3.3 Modelització de tempestes	21
3. Àrea d'Estudi	23
3.1 Descripció geogràfica	23
3.1.1 Diversitat de la costa catalana	24
3.1.2 La cubeta del Mediterrani occidental	25
3.2 Disponibilitat de dades	27
3.3 Patrons meteorològics dels vents	30
3.3.1 Direccionalitat i característiques dels vents	30
3.4 Patrons oceanogràfics	33
3.4.1 Direccionalitat de l'onatge	35
3.4.2 Característiques de l'onatge	36
3.5 Esdeveniments extrems	37
3.5.1 Tempestes a Catalunya	37
3.5.2 Direccionalitat	38
3.5.2 Característiques de les tempestes	40
3.6 Nivell mig del mar	
4. Temporal del 28/09/15-01/10/15	42
4.1 Situació meteorològica	42
4.2 Alerta d'emergència	44
4.3 Conseqüències del desastre	45

	Pàgina
5. Metodologia	47
5.1 Modelització SWAN	48
5.2 Tractament de dades	49
5.3 Identificació de la tempesta	50
5.4 Recorregut de màxims	53
5.4.1 Matriu de màxims	54
5.4.2 Màxim absolut	55
5.4.3 Mapa de màxims	56
5.4.4 Evolució de Màxims en el temps	58
5.4.5 Comparació d'altures d'ona amb flux d'energia	61
5.5 Algoritme de cerca i seguiment	62
6. Discussió de resultats	65
6.1 Consistència de les dades	65
6.2 Procediment i resultats	66
7. Sumari	68
8. Conclusions	70
9. Referències Bibliogràfiques	71

# 1. INTRODUCCIÓ

---

## 1.1 MOTIVACIÓ

Molt s'ha tractat sobre la climatologia i els patrons meteorològics que afecten als sistemes costaners a Espanya i, especialment, a Catalunya. Professors que han consagrat la seva vida al desenvolupament d'aquesta matèria i que han transmès aquest coneixement a través de treball en benefici dels recursos i serveis que ens ofereix la costa i els ecosistemes que s'hi han format. La meua intenció en la elecció i l'elaboració d'aquest treball no és intentar emular aquestes persones i establir nous mecanismes en la forma que concebem els processos climàtics generals que es formen en aquesta part del Mediterrani. El meu objectiu és senzillament aportar un gra de sorra en aquest ja de per si enorme i inabastable oceà de coneixement.

Aquest és un treball que he començat amb molt interès i que per a mi suposa submergir-se en un territori inexplorat. Analitzar un temporal en el mar en totes les seves fases ha sigut el que ha despertat la meua curiositat. A partir d'aquí, el repte que se m'ha plantejat és poder trobar un mecanisme que ajusti millor les trajectòries que descriuen les ones més fortes i energètiques produïdes per aquestes situacions tempestuoses. Amb aquest resultat espero oferir unes conclusions per tal de determinar quins punts de la costa són més sensibles en el moment en que es genera una pertorbació atmosfèrica, o com a mínim, realitzar un seguiment que sigui vàlid per a una determinada situació.

La possibilitat d'ampliar la nostra visió en aquests fenòmens tan catastròfics que poden generar enormes pèrdues en infraestructura i recursos naturals, o que fins i tot poden arribar a provocar pèrdues de vides humanes, també és una motivació important que m'he plantejat per a seguir amb el desenvolupament del treball. No vull dir que amb aquest estudi es puguin arribar a salvar vides, però sóc conscient que qualsevol informació que es pugui aportar sobre aquests fenòmens sempre serà poca.

La meua missió comença amb realitzar una recerca bibliogràfica intensa sobre ciclons, tempestes, algoritmes, bases de dades i estudis climatològics en general per obtenir les habilitats necessàries que hem manquen en aquest camp i poder avançar en el treball. A part d'això compto amb els coneixements que he adquirit al llarg del Grau d'Enginyeria Civil i, sobretot, de les assignatures dels departaments de marítimes, estadística i mètodes numèrics, que seran posats a prova per obtenir un anàlisi coherent i intentar arribar a bon port.

Amb tot això espero recórrer aquest camí amb la intenció d'aconseguir els objectius que m'he marcat però en el cas de no trobar una solució correcta per a aquesta proposta, la meua missió serà la d'exposar els punts que no m'han permès obtenir els resultats desitjats. D'aquesta manera també es pot ampliar aquest camp amb l'esperança de que algun dia, altres estudiants o investigadors puguin trobar una base per a reconduir aquesta investigació.

## 1.2 TEMPESTA: DEFINICIÓ I PROBLEMÀTICA

Tempesta és aquell fenomen meteorològic que està produït per desequilibris tèrmics a la troposfera i per alteracions de pressió a la superfície. La coexistència de dos masses d'aire a diferents temperatures provoca un contrast que pot desembocar en ratxes de vents amb velocitats molt altes, nuvolositat i precipitacions i ocasionalment en calamarsades. Fins i tot, poden portar descàrregues elèctriques en forma de raigs, trons i llampecs. Quan una tempesta es forma a sobre el mar, provoca una gran alteració a la superfície marina. Això implica la generació d'onatges intensos que es deriven dels forts vents o també pot provocar l'increment de l'energia en les ones formades per altres factors. Sovint es possible també que un fenomen d'aquest tipus pugui arribar a augmentar el nivell del mar.

Avui en dia, les poblacions humanes es troben concentrades amb més freqüència en les zones costaneres que en altres punts del territori. Un efecte produït pels beneficis que porta la vida a la costa com l'accés a desplaçaments marítims, la pesca, el turisme, l'oci, etc. Aproximadament el 40% de la població mundial (uns 3 milers de milions de persones respecte el total de la població), es troba assentada en una franja de menys de 100 km a la costa (IPCC, 2014). A mesura que la població i la densitat augmenta en aquesta franja, l'activitat econòmica de la zona creix i això incrementa la influència sobre els ecosistemes costaners. Conversió de l'hàbitat, modificacions en el terreny amb usos diversos, abocament de residus i introducció invasiva d'espècies en altres ecosistemes són el conjunt de connotacions negatives de l'activitat humana a la costa que han portat una pèrdua significativa de la biodiversitat.

A part de l'alteració dels ecosistemes s'ha de tenir en compte que un tram de costa que ha sofert aquest canvis es més sensible a les conseqüències que es puguin generar de qualsevol temporal costaner. Tota població que es pugui concentrar a zones de baixa elevació (definida per 10 m per sobre el nivell del mar) es veurà afectada per aquests fenòmens que poden produir grans pèrdues en infraestructura i fins i tot posar en perill la vida de les persones. Quanta més gent es desplaci a viure a la costa, els desastres naturals com els huracans, tempestes tropicals, tsunamis etc. tindran un efecte més devastador. Fins i tot les tempestes més petites poden resultar significatives i portar algun tipus de risc per a tota aquesta gent.

Durant les últimes dècades, la preocupació de l'efecte del canvi climàtic sobre les costes i les formacions naturals que formen la primera línia de defensa contra els mars i els oceans arreu del món, ha anat en augment. Aquest ha sigut el punt detonant que ha portat a diferents organismes governamentals i departaments de meteorologia de tot el món a invertir més recursos i esforços en recerques marítimes, meteorològiques i oceanogràfiques per intentar caracteritzar els processos que es porten a terme a gran escala en la desaparició continuada de les platges. Aquests recursos han ajudat a la creació de potents xarxes d'estacions meteorològiques, boies, mareògrafs, avionetes, satèl·lits meteorològics, etc. La facilitat d'obtenció de dades que hi ha avui dia és en benefici dels estudis marítimes que es suporten en aquestes xarxes i que combinen tot tipus de mesures en la interacció mar-aire.

Però les conseqüències del canvi climàtic es donen amb el pas de les dècades i els segles, les tempestes en canvi, tenen un efecte immediat o es produeix amb una diferència de pocs dies (Sánchez-Arcilla et al., 2016).

### 1.3 CONSEQÜÈNCIES DE LES TEMPESTES

Els efectes d'un desastre a la costa es produeixen quan aquest es troba en les immediacions o quan els efectes generats, com el vent o el desplaçament d'aigua, segueixen fins arribar als assentaments costaners. Cada any aproximadament 10 milions de persones pateixen aquests efectes que poden anar des de petits increments en el nivell del mar fins a grans tsunamis (Adger, N., & Hughes, T.2005). Les conseqüències més immediates associades a una tempesta en el Mediterrani són els forts vents, les precipitacions i els onatges intensos.

- (i) Els vents al Mediterrani no tenen un impacte tan gran com en zones de Nord-Amèrica o el Carib on es formen grans ciclons tropicals tots ells amb ratxes de vents tan altes que poden generar tornados. Tot i això, en un reportatge elaborat pel *Munich Reinsurance Company* durant un període de 10 anys, es van registrar 104 casos de vents forts provinents de temporals al Mediterrani que van causar danys greus (MEDEX, Jansà et al., 2001a). Només a Espanya es van registrar 28 morts entre 1996-1999 per la mateixa causa (dades del Programa de Desastres Naturals del Departament de Defensa Espanyol).
- (ii) Les inundacions són la principal catàstrofe natural amb més pèrdues materials i humanes que es dona amb una certa freqüència a Espanya i Catalunya. Aquestes es produeixen a causa de dos factors: fortes precipitacions que s'acumulen en un punt durant un cert temps i ones que superen les platges i les primeres línies de defensa. Si una tempesta es dona quan el nivell del mar és més alt, la quantitat d'aigua que es desplaça és major i pot prendre més territori a la costa. En el mateix període de 1996-1999 hi van haver 155 morts per inundacions.
- (iii) Quan un conjunt d'ones de gran magnitud arriben a la costa, com a mínim provocarà un augment dràstic en el gradient d'erosió que en alguns casos pot arribar a emportar-se la totalitat dels sediments que formen la platja (Gracia et al., 2013). El procediment per al bon manteniment de les platges consisteix en el trasllat de sediments (normalment sorra) d'altres zones als punts afectats. Aquest és un sobrecost molt important en països que depenen del turisme com Espanya on s'inverteixen uns 200 milions d'euros a l'any en el moviment de  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup> d'arena. (Hanson et al., 2002). A part, no s'han d'oblidar els possibles danys que es poden produir en embarcacions i en infraestructura costanera com passeigs.

Tenint en compte la vulnerabilitat d'aquest territori tan important per a la societat, i agafant consciència dels perills que hi ha associats, és indispensable la investigació i recerca sobre els perills que posen en risc aquest sistema.

## 1.4 OBJECTIU

En aquest treball es presenta el tractament del temporal que va ocórrer entre els dies 28/09/2015 i 01/11/2015. Aquesta recerca individual centrada en aquest únic fenomen ha esdevingut en un estudi exhaustiu sobre tots els mecanismes que han coincidit en la formació d'aquesta tempesta, el seu desenvolupament i les seves conseqüències. De totes les variables meteorològiques i oceanogràfiques que es poden datar durant un esdeveniment d'aquestes característiques, l'objectiu principal és detallar l'evolució de l'onatge que es va produir durant aquests quatre dies i, quan ja estigui caracteritzat, intentar trobar un algoritme de seguiment i rastreig de les altures més altes amb el software indicat. Un exercici que permetrà saber si els màxims d'ona formen trajectòries definides i quantificables en el Mediterrani, essent la primera vegada que es realitza un tractament d'aquestes característiques en aquest mar.

Per a aconseguir aquesta eina, s'han utilitzat els resultats de potents models de computació d'ones, dels quals s'exposen estudis comparatius sobre la seva fiabilitat, amb els que es pot detallar l'estat del mar amb una variable escollida que en aquest cas és l'altura d'ona. Computant aquests models amb el període marcat es pot fer un anàlisi en el temps i caracteritzar l'evolució de les ones amb una progressió lineal.

## 1.5 ESQUEMA DEL TREBALL

Aquest treball s'estructura en els següents cinc capítols:

- (i) En primer lloc, per a establir els fonaments de la recerca s'introdueixen els antecedents que conformen l'**estat del coneixement** en tres aspectes fonamentals. Primerament es detallen estudis climatològics que han caracteritzat patrons de tempestes i ciclons dels quals es poden extraure trajectòries i rutes principals que són un element indispensable per a la conformació del clima. D'aquesta manera s'introdueixen conceptes importants en la progressió d'un temporal que serviran per a la comprensió de la tempesta a analitzar. Seguidament, es presenten els algorismes de seguiment de ciclons per a tenir coneixement sobre bases de dades i seguiment de pressions. Per últim, són introduïts els models de generació i propagació d'ones que tindran un paper important en el cos del treball i en la descripció de la zona Mediterrània de Catalunya.
- (ii) En segon lloc, es troba l'apartat dedicat a l'**àrea d'estudi** que és el punt focalitzat en la caracterització de les costes catalanes i els patrons meteorològics i oceanogràfics del Mediterrani occidental. Per a representar la zona de costa, s'ha fet servir una descripció comparant



els diferents trams que comprenen el recorregut per la gran diversitat de la zona. Això s'ha fet des d'un punt de vista geogràfic i geològic indicant quins tipus de formacions costaneres abunden en cada part i les seves característiques geològiques. A continuació, es tracta la cubeta del Mediterrani occidental en termes de *fetch* o recorreguts d'ona amb la finalitat de donar informació sobre la mobilitat que tenen les ones abans d'arribar a Catalunya. Així es pot advertir quines són les zones més susceptibles de rebre els onatges més intensos.

- (iii) El cos del treball comença amb la **caracterització de la tempesta** esmentada en forma de reculls de premsa i informes meteorològics obtinguts del Servei Meteorològic de Catalunya. Una recerca orientada a determinar quin tipus de fenomen es va produir i quins punts de la costa van ser els més afectats, per tenir una referència sobre que es pot esperar en el moment de reproduir el seguiment del temporal.
- (iv) A continuació, la **metodologia** comprèn l'exercici del programa de càlcul en llenguatge *matlab*, pas per pas que s'ha utilitzat per poder extreure tots els resultats gràfics de les bases de dades que s'han fet servir. Des de l'obtenció dels primers màxims fins a la computació més complexa de les línies que marquen el recorregut de les altures d'ona més altes, es mostra quin és el codi utilitzat explicant el seu funcionament i les aplicacions que operen en cada resultat. Aquesta recopilació de resultats i eines posaran les bases per a descobrir quina forma té una tempesta en imatges de píxels i quina és la zona més adequada per poder començar amb el model de rastreig i seguiment de les ones.
- (v) Per acabar es fa una **discussió dels resultats** obtinguts per veure si realment són les trajectòries que s'han format tenen algun sentit respecte a la seva posició i direcció. També al final es troben el **sumari** i les **conclusions** per discutir els subjectes que han quedat oberts en aquest estudi per a futures recerques que busquin ampliar aquest coneixement treballant amb altres situacions o tempestes.

## 2. ESTAT DEL CONEIXEMENT

---

Múltiples treballs, estudis i recerques s'han portat a terme amb l'objectiu de buscar patrons per a les trajectòries de ciclons i tempestes al llarg de les costes europees de l'Atlàntic i de la regió del Mediterrani. La finalitat d'analitzar aquests treballs és per a tenir un millor coneixement sobre aquests fenòmens i l'intent d'una futura extrapolació de les tècniques presentades per a aconseguir un *storm\_tracking* (trajectòria de la tempesta) viable. També s'intentarà trobar en aquesta secció, no només informació sobre trajectòries i desplaçaments d'esdeveniments tempestuosos, sinó també la comprensió de la dinàmica d'aquestes situacions durant la seva vida, des de la ciclogènesi fins la ciclòlisi.

Per a donar suport a les dades utilitzades en els següents apartats, tant en la caracterització de l'Àrea d'Estudi com en el cos del treball focalitzat en el tractament del temporal que s'ha d'analitzar, també es fa referència a algorismes de seguiment de tempestes i al tractament dels models d'ona més comuns en l'àmbit de Catalunya.

### 2.1 TRAJECTÒRIES

L'estudi de les trajectòries que descriuen les tempestes i els ciclons porta a l'anàlisi de dades recopilades durant molts anys d'observació i mesura i l'establiment de formes de comportament d'aquests fenòmens. Bàsicament es tracta d'una recerca de les condicions meteorològiques que afecten a una zona i establir les tendències que tenen els ciclons. Els ciclons representen la interacció més important entre el aire i el mar i tenen una gran influència en les característiques de un clima a gran escala, per tant, estudiar el seu comportament es de gran importància per a establir una base de treball en *storm tracking*.

#### 2.1.1 Tempestes i ciclons a l'Atlàntic Nord

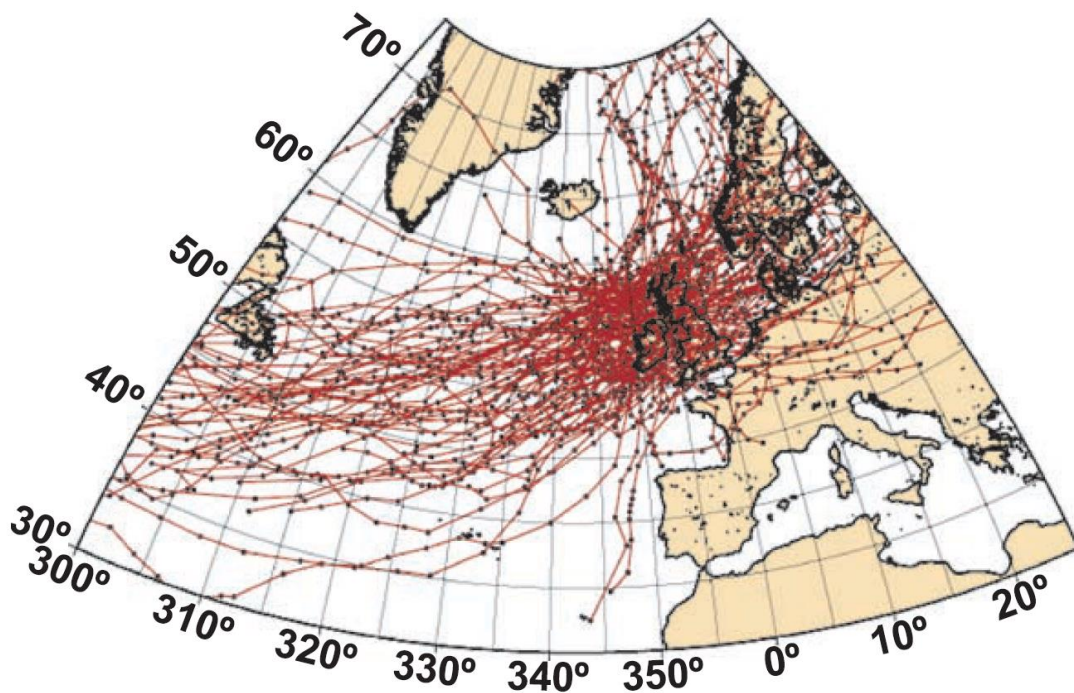
Aquesta recerca, descrita en un article publicat per Lozano et al. (2004), es basa en la identificació i seguiment de ciclons extratropicals al Nord-Est Atlàntic que afecten les costes europees.

Mitjançant registres de vent recopilats a les estacions meteorològiques al llarg de tot l'Atlàntic europeu, es poden identificar els temporals que poden afectar la costa. La base de dades *Global Tropical and Extratropical Cyclone Climate Atlas* (GTECCA, 1996) proporciona informació sobre trajectòries, la pressió central del cicló i velocitats dels desplaçaments. Aquesta informació aportada pel GTECCA (1996) està basada en observacions d'interval de 6 hores durant el període de 1965-1995. Quan ja s'han obtingut els patrons atmosfèrics, s'han de superposar amb les dades meteorològiques per trobar una relació.

Per a la identificació de tempestes costaneres es va utilitzar el mètode *Peak Over Threshold* (POT), que consisteix en marcar un valor llindar d'alguna variable a

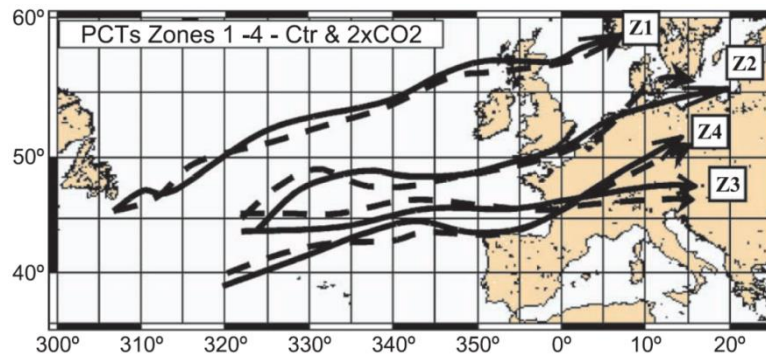
partir del qual es suposa condicions de tempesta. En aquest cas la variable utilitzada va ser la velocitat del vent i el llindar utilitzat, 15,3 m/s. Aquest llindar es va marcar per a les estacions més pròximes al temporal. A la resta de les estacions, que també van obtenir registres de forts vents, es va utilitzar un llindar proporcionalment inferior. S'ha de tenir en compte que un fenomen pot ser enregistrat per diferents punts d'observació repartits al llarg d'una costa, i els seus resultats poden ser molt diferents.

Per a la següent fase, GTECCA (1996), va ser utilitzada per a identificar els orígens dels temporals costaners. Aquesta superposició va mostrar que la majoria dels ciclons que s'aproximen a Europa des de l'Est, segueixen una ruta ben definida en direcció nord-est des de les proximitats de Terranova (Canadà) i el sud-oest d'Islàndia. La figura 2.1 mostra els resultats de les trajectòries dels ciclons d'hivern que van arribar a la costa.



**Figura 2.1** Trajectòries dels ciclons d'hivern entre els anys 1975-1984 seleccionats del GTECCA (1996).  
Font: Lozano et al. 2004

Aquest conjunt de línies caòtic va ser simplificat en trajectòries principals de ciclons, o el que és el mateix, *Principal Cyclone Tracks* (PCT). Les PCTs es van definir amb una mitjana de les posicions dels centres del ciclons que es troben en un rang de 6 hores i la seva finalitat és ajudar a clarificar els resultats obtinguts per trobar amb més facilitat tendències que poden tenir el conjunt de ciclons. Podem veure un exemple d'això en la figura 2.2, on es mostra les PCTs que es van proposar per a aquest estudi amb la finalitat de comparar-les amb les trajectòries proposades que prendrien en un escenari futur d'aquí a 50 anys.



**Figura 2.2** PCTs obtingudes de les formacions de ciclons de l'Atlàntic Nord. Les trajectòries discontinues pertanyen a l'experiment de storm tracking que es va realitzar en aquest estudi descrit en l'apartat 2.2  
Font: Lozano et al. 2004

S'ha de tenir en compte que el nombre de ciclons no és constant conforme avancen les PCTs. Els ciclons de l'Atlàntic tenen una vida mitjana de 4,5 dies i quan trobem concentracions altes en el nombre de ciclons sempre va lligat a un decreixement de la pressió.

Com a resum d'aquesta investigació es pot concloure que treballant amb una base de dades suficientment gran com és la del GTECCA (1996) es pot establir una climatologia de tempestes. En aquest cas, ha permès la producció de les PCTs que mostren patrons de comportament en termes de direcció i de magnitud de les turbulències (quantitat de ciclons).

### 2.1.2 Ciclons a la regió mediterrània

La metodologia que es porta a terme en el treball de Lionello et al. (2006) introdueix aspectes importants en trajectòries de ciclons que es basa en la comprensió de les dinàmiques responsables de la seva formació i evolució. Tot i que l'objectiu d'aquest treball no és establir patrons climatològics mitjançant les rutes que segueixen els ciclons, sí que introdueix un aspecte a tenir en compte: l'índex NAO (North Atlantic Oscillation).

Wallace et al. (1988) va afirmar que les trajectòries regulars que segueixen els ciclons en el Mediterrani estan relacionades amb les ones de guia baroclíniques (la baroclinitat és un indicador d'instabilitat atmosfèrica), i Pettersen's (1956) va demostrar que també estan relacionades amb una alta alternació entre ciclons i anticiclons. En termes generals trobem que al Mediterrani occidental abunden més les àrees de ciclogènesi i al Mediterrani central i oriental, apareixen més zones de ciclòlisi.

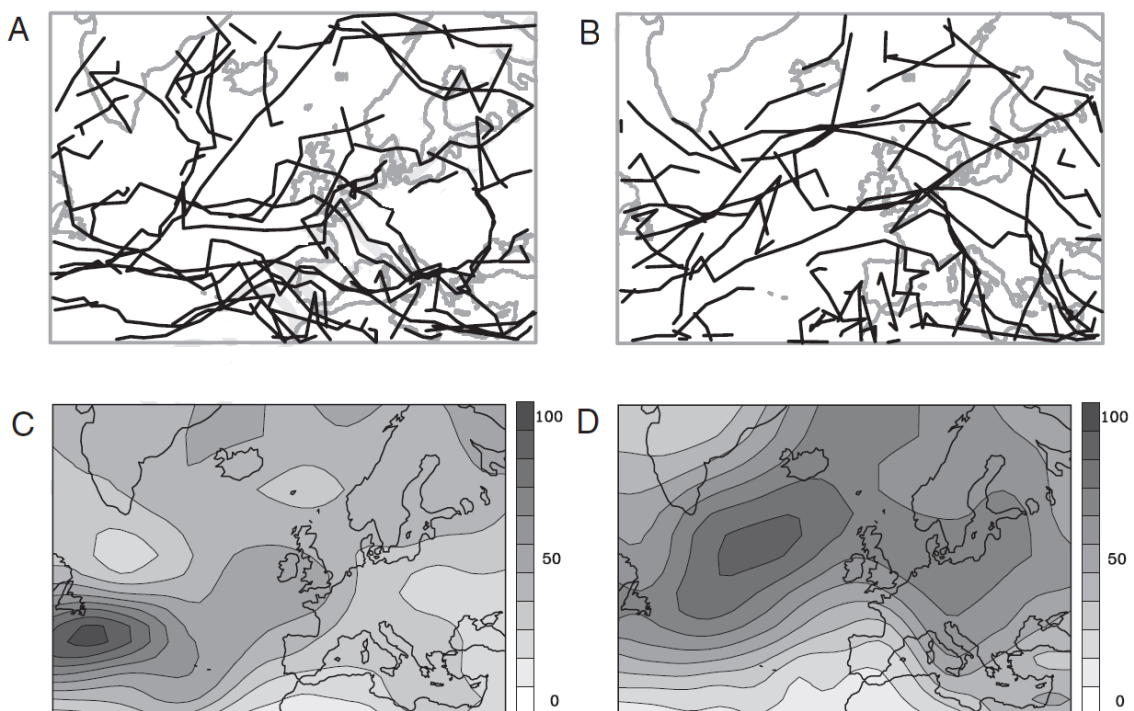
El NAO (Hurrell and Deser, 2009) és un indicador de fluctuacions de pressió atmosfèrica a sobre el nivell de l'oceà Atlàntic que marca la diferència entre la baixa Islandesa i la alta de les Illes Açores. Aquesta oscil·lació està altament relacionada en la variabilitat interanual del clima i el temps, en termes de intensitat i nombre de ciclons que es poden produir en un any, ja que controla la direcció i força dels vents.

Per a aquest estudi s'ha fet servir la base de dades MEDEX (MEDiterranean Experiment on Cyclones that produce high impact weather in the Mediterranean), desenvolupada per l'Organització Meteorològica Mundial, que combina la alta resolució dels recents anàlisis (HIRLAM/INM i ECMWF) fruit de tècniques de previsió

més homogènies, amb el reanàlisi de bases més antigues (ERA40, veure apartat 2.2.2) que són producte de la homogeneïtzació de les fonts constituïdes al llarg de dècades que s'han anat formant amb diferents tècniques d'observació i mesura. A part de totes les dades recopilades sobre els ciclons i la seva climatologia, també s'ha fet ús d'una base que recopila canvis en la pressió a nivell del mar (SLP, *sea level pressure*) i que forma part del projecte EMULATE, (*European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATE variability*) elaborat per la *Climatic Research Unit* centrat en l'estudi del canvi climàtic a nivell mundial.

L'activitat dels ciclons que es desenvolupa a l'Atlàntic Nord i a Europa pot ser estudiada mitjançant anàlisi de variabilitat sinòptica com en l'estudi anterior. En aquest treball trobem que, després de passar un filtre que reté les principals variacions en la SLP (més altes de 25 hPa) en períodes de 1-7 dies, podem identificar canvis que s'han produït en les mateixes èpoques en diferents anys. Això està directament relacionat amb l'índex NAO que ens mostra diferències en l'altura geopotencial, la desviació estàndard i les trajectòries, ja que aquesta oscil·lació està connectada amb la variabilitat interanual de la intensitat i el nombre de ciclons.

L'exemple proposat és un anàlisi de dos períodes amb un índex NAO molt diferent: gener de 1966 i gener de 1983 (figura 2.3). Entre els dos períodes, amb un NAO baix i alt respectivament, es pot veure una forta variabilitat que afecta a les zones d'influència de les tempestes. Per exemple, al 1966 apareix una intensa activitat sinòptica a l'Oest de les Açores i aquestes formacions es desplacen en direcció Est cap al Mediterrani. En canvi al 1983, les PCTs conflueixen al Nord de les Açores i es desplacen cap a l'interior d'Europa.



**Figura 2.3** Comparativa de trajectòries de ciclons a Europa i l'Atlàntic Nord associades al seu índex NAO corresponent a sota. Les imatges de l'esquerra corresponent a un NAO baix (Gener de 1966) i les de la dreta a un NAO alt (Gener de 1983). Font: Lionello et al., 2006

Per a poder estudiar el clima del Mediterrani s'ha d'entendre que la majoria dels ciclons que es formen en aquesta regió són causa fenòmens externs com el NAO que hi juguen un paper important. Aquesta afirmació aporta complexitat al comportament del clima per la gran quantitat de ciclons diferents que s'hi poden distingir: segons on s'han format, el comportament estacional i, sobretot, el camí que recorren.

## **2.2 ALGORITMES DE SEGUIMENT DE TEMPESTES**

La necessitat de trobar el comportament de les tempestes en una situació futura on poden canviar les condicions meteorològiques actuals ha portat al desenvolupament de models i algoritmes que permeten la investigació d'aquests agents en un altre escenari climàtic. Els algoritmes de seguiment de tempestes són mètodes més sofisticats que l'observació del comportament climàtic i que també s'utilitzen en meteorologia ja que detecten regions de formació (ciclogènesi) i desaparició (ciclòlisi), així com també camins específics per a cada tempesta individual (Lionello et al., 2002).

El funcionament bàsic de qualsevol algoritme de seguiment, es basa en un mètode d'identificació de tempestes en determinades particions de temps. Quan una tempesta s'ha identificat, ja sigui pel seu centre de baixa pressió o per qualsevol altre punt, se li atorga una etiqueta que és la seva cèl·lula ID. Quan aquesta tempesta es torna a registrar en una altra posició en una partició de temps futura, es marca la seva nova localització. Establir un seguiment consisteix en la unió de totes les localitzacions que s'han marcat en les particions des de que s'ha assignat la seva ID per primera vegada fins a l'última observació. Múltiples autors han utilitzat mètodes algorítmics de seguiment (Lozano et al., 2004; Trigo, 2005) i sempre parteixen de la mateixa base però poden utilitzar condicions de contorn i llindars de detecció diferents. Aquesta idea conforma la base en la que s'han desenvolupat els algoritmes de seguiment aplicat a ones que es veurà en l'apartat 5.

En aquesta secció s'exposen dos exemples d'aquests algoritmes en la pràctica. En primer lloc es mostra com s'ha desenvolupat l'estudi de l'apartat 2.1.2 de Ciclons en l'Atlàntic Nord, en la seva proposta de les PCTs que es formaran en un futur alternatiu. Seguidament es mostra una comparativa de les dos bases de dades meteorològiques més importants a l'Atlàntic Nord i al Mediterrani, que a més serà d'ajuda per a reconèixer alguns aspectes importants en els següents apartats.

### **2.2.1 L'experiment ECHAM4**

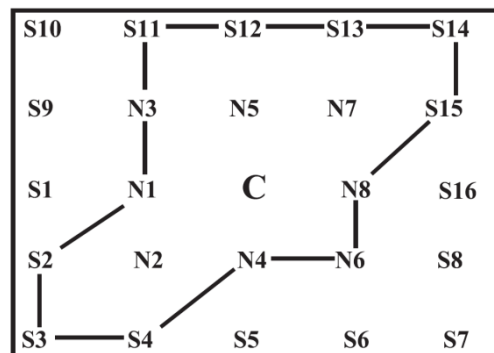
Desenvolupat pel Max-Planck-Institute, el model ECHAM4 és un tipus de GCM (*Global Climate Model*) que es va crear a partir dels models de recerca meteorològica que fa servir el ECMWF i va ser adaptat a la investigació del clima. Aquesta eina va ser utilitzada també en la recerca de Lozano et al. 2004 per a simular els possibles canvis en el clima a causa de la contaminació atmosfèrica respecte a les condicions climàtiques d'aquella actualitat.

En aquest experiment es van realitzar dues simulacions amb el ECHAM4: una simulació de control entre els anys 1970-1999 per poder veure si el model s'ajustava a



la realitat, i una altra simulació entre 2060-2089 que representa el futur escenari. Els resultats del GCM amb el model ECHAM4 per a l'escenari de control van ser raonablement bons. Aquests es van comparar amb els del ECMWF i es pot deduir que les *storm tracks*, tant per la seva localització com la forma, estan ben representades a la nova simulació. Tot i això, aquest mètode no va resultar completament fiable. Un error notable va ser que els ciclons i els anticiclons no podien ser satisfactòriament distingits perquè la seva variància en el camp de pressions és similar, independentment de si són centres d'altres o baixes pressions. A part d'això, s'ha de tenir en compte que els centres dels ciclons poden estar desplaçats des del punt on s'ha registrat l'anomalia i per tant, la seva distribució espacial pot no ser del tot acurada.

Per a pal·liar aquestes deficiències es va proposar un mètode complementari: un algoritme per calcular les trajectòries de ciclons. En primer lloc es crea una malla de punts i s'identifica un mínim local on l'altura geopotencial es de 1000hPa (punt C, figura 2.4). A partir d'aquí es fixa un marge l·lindar que han de tenir les diferències de pressions entre els punts de l'entorn i el centre mínim. Quan aquest l·lindar es supera, el punt queda marcat i procedeix a comprovar un altre punt (punts  $N_i$  i  $S_i$ , Fig. 4). El l·lindar escollit va ser de 20m/1000m d'altura geopotencial i això ha de passar durant al menys una vegada en la vida del cicló, que per a tal efecte s'ha marcat en 48 h. L'últim pas es verificar que es poden connectar els punts trobats de baixa pressió amb els seus veïns més pròxims que hagin superat el l·lindar. El requisit es que formin una cadena tancada tal com indica la figura 2.4. Aquesta primera tasca marca la identificació d'un sistema.



**Figura 2.4** Diagrama de l'algoritme utilitzat en Storm Tracking. Font: Lozano et al., 2004

Seguidament, amb els sistemes que han sigut identificats, es forma una trajectòria mitjançant una cerca d'altres sistemes propers i es connecta de punt a punt. El problema d'aquest algoritme és quan es troben en contacte o es solapen diferents anomalies, que no poden ser distingides correctament. El interval de temps que es va escollir per a realitzar les proves amb l'algoritme va se de 6 h.

Els resultats d'aquesta metodologia es mostren a la figura 2.2 on les PCTs en discontinu representen les trajectòries en l'escenari de l'any 2060. Independentment dels resultats que buscava aquest treball sobre com afectaria aquesta situació simulada al nombre i a la intensitat dels ciclons, es pot assegurar que aquesta es una eina eficaç en *storm tracking* pels resultats obtinguts, que han sigut prou satisfactoris i consistents al comparar-los amb les dades de control.

### 2.2.2 ERA-40 i NCEP/NCEAR.

Tant a Europa com a qualsevol altra part del món, qualsevol treball, estudi o recerca es sustenta en sobre conjunt de bases de dades i/o reanàlisis que han estat obtinguts per un seguit d'instruments de recerca i observació supervisada pels departaments de Meteorologia que operen en les zones a les quals es fa referència.

El procediment a seguir en qualsevol confecció d'aquestes bases de dades a nivell marítim, sempre comença amb la detecció d'una pertorbació (ona o vent) per un instrument (boia, estació meteorològica...). Aquestes variacions es recopilen en sèries de dades que agrupen un conjunt de registres cada cert període de temps i la suma d'aquestes sèries durant els anys van conformant les grans bases que existeixen avui dia i que contenen amb varies dècades d'anàlisis i de modelitzacions. El problema és que durant el temps que s'han realitzat les observacions els mètodes de recerca han anat evolucionant, es per això que és realitzen els reanàlisis, per a intentar corregir defectes en el solapament de dades que es puguin derivar a causa d'aquesta millora tecnològica.

Els reanàlisis ERA-40 (*ECMWF 40-year reanalyses*) i NCEP/NCEAR (*National Centres for Environmental Prediction/ National Centre for Atmospheric Research*) són dos de les bases de dades més importants que s'utilitzen a Europa i a l'Atlàntic Nord. Aquests sistemes estan basats en malles de diferent resolució que computen dades a escala global.

- (i) **ERA-40.** Utilitzat pel centre de recursos meteorològics europeu, aquest reanàlisi ha pres dades atmosfèriques i de superfície durant 45 anys (1957-2002). A banda de la instrumentació habitual, moltes dades es van prendre amb aparells tan diversos com radiosondes, avionetes, satèl·lits o difusòmetres. Tot i que avui dia no es troba operatiu, s'utilitza en molts estudis en que es necessita un anàlisi detallat de sistemes climàtics gràcies a que disposa de molta informació en formati digital de dècades prèvies al registre informàtic. Al seu torn, aquesta pot ser tractada per software més complex que es desenvolupa avui dia com es veurà en aquest apartat.
- (ii) **NCEP/NCEAR.** Utilitzat com a suport en modelitzacions d'ones per a Puertos del Estado, aquest sistema compta amb observacions que daten des del 1948 i segueix funcionant en l'actualitat. Una base tan extensa com aquesta conta amb diferents períodes de reanàlisi (el pla inicial era tornar a analitzar el període de 40 anys de 1957-1996) que s'han realitzat amb diferents resolucions espacials. És una recopilació molt completa que compta amb més de 80 variables, incloent altura geopotencial, temperatura, humitat relativa, velocitats de vent, etc.

Trigo (2005) contraposa aquests dos reanàlisis amb l'objectiu de trobar quina base de dades pot resultar més precisa en qualsevol recerca sobre climatologia o variabilitat interanual al sector Euro-Atlàntic. Aquesta recerca considera diversos punts en termes de distribució espacial, característiques de les tempestes i l'impacte que té la resolució de les dades en *storm-tracking*, fent servir un algorisme de seguiment de tempestes. Aleshores el punt a destacar serà el de presentar els dos resultats de



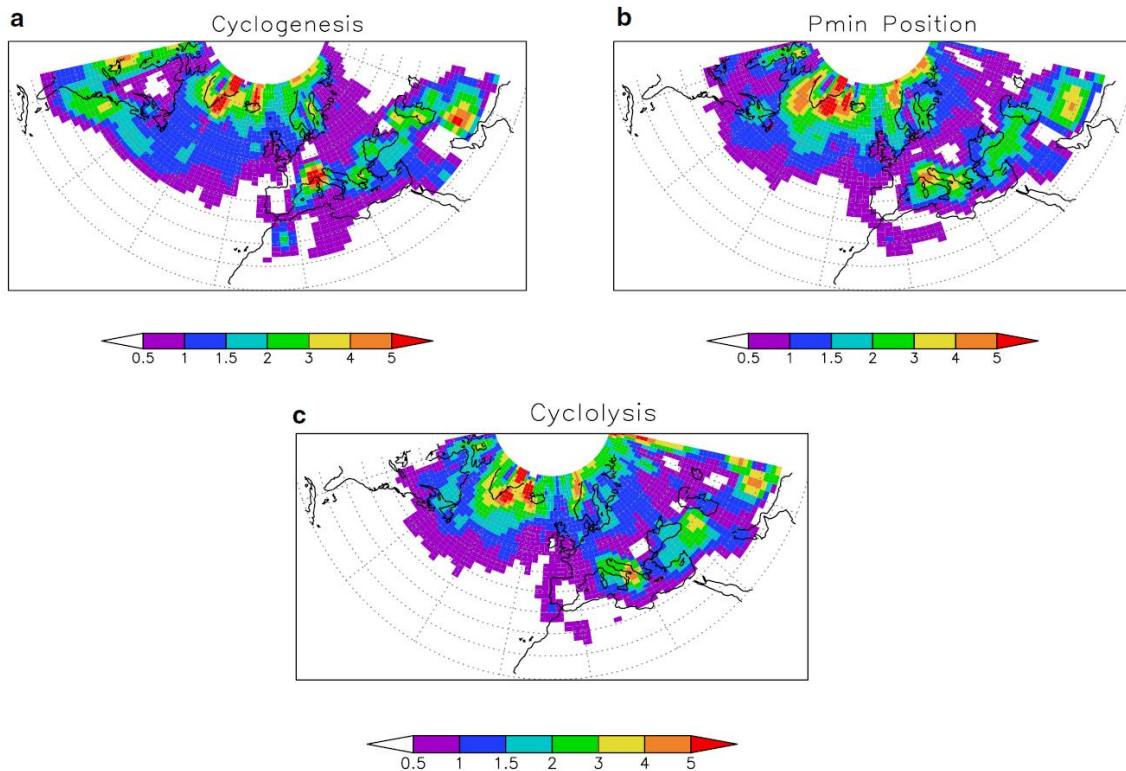
distribució de les trajectòries i trobar quina base de dades és més útil per a la zona analitzada.

La metodologia que intervé en el procés no varia d'altres estudis de *storm-tracking*: identificar i seguir punts amb altura geopotencial baixa mitjançant mètodes automatitzats aplicant els filtres corresponents. Tot i això, en aquest estudi s'ha fet servir l'algoritme amb la resolució més alta possible per a cada reanàlisi, a part de treballar també amb altres resolucions coincidents entre les dos bases per poder establir discrepàncies i per identificar quin impacte pot tenir en els resultats.

L'algoritme utilitzat va ser desenvolupat per Trigo et al. (1999) i emprat la regió mediterrània. Aquest està aplicat a una altura geopotencial base de 1000 hPa per als dos anàlisis nombrats de 40 anys. El procediment ja tractat en l'experiment anterior de la detecció dels mínims potencials i el seguiment a través de buscar el veí més proper ha sigut descrit en molts projectes. Els llimars utilitzats són: un mínim geopotencial sempre inferior a 1020 hPa (amb el geopotencial del centre sempre inferior a 1010 hPa), un gradient superior a una diferència de 0,55 hPa cada 100km, una velocitat màxima dels ciclons de 50 km/h per als ciclons en direcció Oest i 110 km/h per als ciclons en direcció Est (en comprovacions cada 6 h) i un temps de vida mínim de 24h.

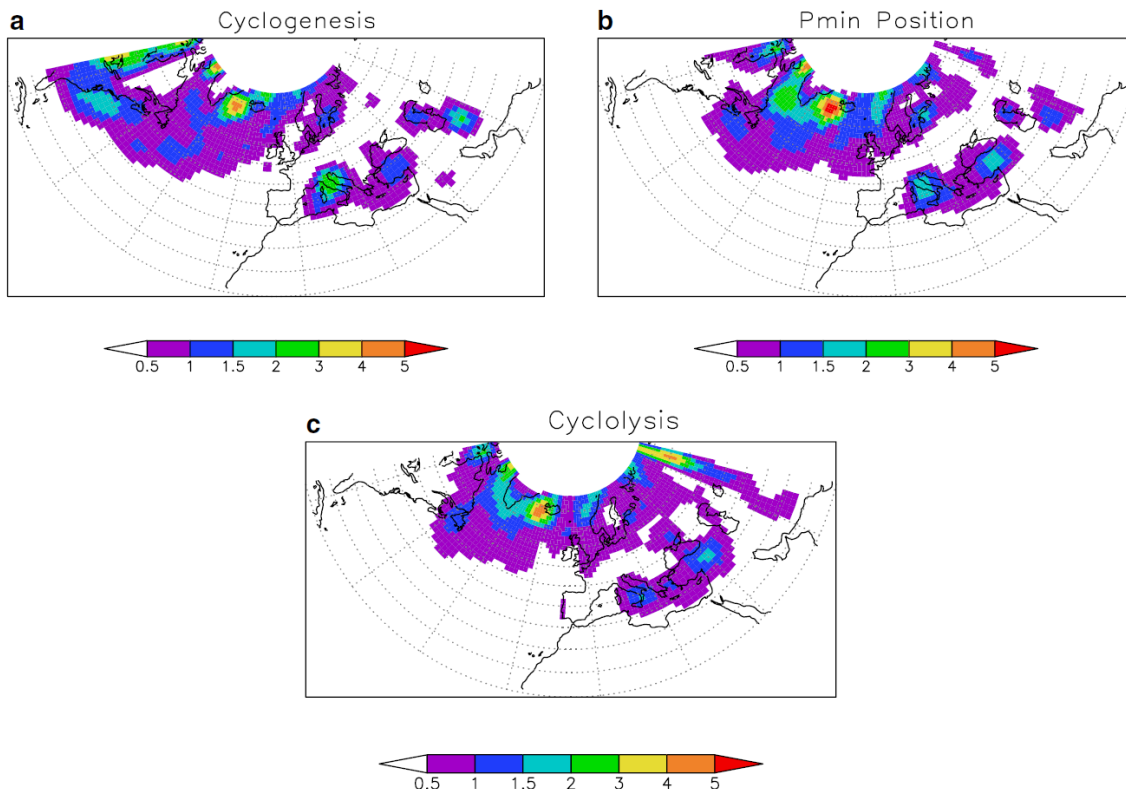
Tot i que s'han aplicat les mateixes condicions per a cada reanàlisi s'ha de tenir en compte que la ERA-40 té una resolució espacial màxima més alta ( $1,125^\circ \times 1,125^\circ$ ) que la NCEP/NCEAR ( $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ). Per a pal·liar aquest efecte, i poder realitzar una comparació acurada, la resolució s'ha adaptat a una quadrícula normalitzada  $5^\circ \times 5^\circ$  en els dos casos. Els resultats del seguiment de tempestes es mostren en tres imatges de distribució espacial de píxels associats a valors de densitats de punts de pressions baixes en els principals estats dels ciclons: àrees de ciclogènesis, les posicions on els ciclons es troben al seu mínim de pressió atmosfèrica, i àrees de ciclòlisi (figura 2.5 i figura 2.6).

- ERA-40



**Figura 2.5** *a* mostra la distribució espacial dels punts de ciclogènesi, *b* els punts on la pressió central es mínima i *c* punts de ciclòlisi. Resultats obtinguts per a ERA-40 per a els sector de l'Atlàntic Nord i Europa. Les escales indiquen la densitat de punts de baixa pressió. Font: Trigo 2005.

- NCEP/NCEAR



**Fig. 6** Mateix procediment que a la Fig. 5 per al reanàlisi NCEP/NCEAR. Font: Trigo 2005

Els dos reanàlisis mostren una bona imatge de la distribució de les diferents densitats de punts al sector Euro-Atlàntic i presenten força coincidències quan es superposen. Moltes recerques coincideixen en que les zones de màxima ciclogènesi són prop de la costa est dels Estats Units, a l'est de Groenlàndia i al golf de Gènova. Tot i això, els mapes del ERA-40 presenten més densitat de ciclons i, fins i tot, en algunes zones apareix més d'un màxim de ciclogènesi, pressió mínima o ciclòlisi. Això es més pronunciat en sectors com l'Orient Mitjà on són més freqüents els ciclons de petita escala. A Europa, tot i que també hi ha una pèrdua significativa d'algun màxim podem dir que els dos reanàlisis interpreten bé aquest seguiment de ciclons de manera general, especialment pel que fa a les àrees on s'acumula més ciclogènesi.

La resolució més alta del model integrat per a ERA-40 afavoreix la detecció dels centres més petits, que es poden correspondre a formacions subsinòptiques o que formen part de sistemes més grans. Tot i això la seva detecció és important ja que tenen molt impacte en climes locals. Per tant, encara que els dos models han coincidit en patrons ciclònics similars que es corresponen als resultats de la majoria d'estudis es pot afirmar que el ERA-40 ofereix un anàlisi més detallat que el NCEP/NCEAR i es per això que hauria de ser la primera opció en qualsevol estudi de situacions extremes o tempestuoses.

D'altra banda, per a establir un anàlisi meteorològic que vulgui descriure les generalitats sobre un clima, en la zona del Mediterrani és suficient el NCEP/NCEAR. Aquesta base de dades, a part de que es un sistema més lleuger (no té tanta resolució), aporta una bona quantitat d'informació en termes de meteorologia més simplificada i és una bona opció sempre i quan no es vulgui enfocar en extrems. Sense anar més lluny, el sistema de modelització que es fa servir en els anàlisis de Puertos del Estado es suporta en el NCEP (veure apartat 3.2).

## **2.3 MODELITZACIÓ D'ONES: SWAN / WAM**

L'estudi de l'evolució de les ones parteix de l'establiment d'un model que permeti obtenir totes les dades rellevants en la formació i desenvolupament d'aquestes per realitzar una predicció adequada de possibles forts temporals. Els principals processos que s'han de considerar en la projecció d'aquests models són l'entrada de registres de vents, la dissipació d'energia i la interacció no lineal d'ones. Al Mediterrani occidental també s'han utilitzat diversos models numèrics compatibles amb la seva situació meteorològica i oceanogràfica per realitzar prediccions d'onatges.

L'objectiu d'aquestes eines és simular la generació i propagació de les ones en termes d'energia, forma, direcció i variacions d'altura al llarg del seu recorregut. Tots els canvis que es produeixen en aquestes variables són resultat del vent, trencament d'ones, transmissió d'energia entre ones i variacions en les corrents oceàniques. Per a establir qualsevol model, es parteix d'unes condicions inicials que indiquen l'altura d'ona, la direcció i el període i a partir d'aquí el model estableix els canvis que es puguin donar a mesura que les ones es vagin desplaçant. La precisió dels resultats depèn dels inputs meteorològics i la resolució de la malla on es sustenta.

La utilització d'una eina numèrica requereix un sistema de predicció de vents associat a una predicció meteorològica. Els models d'ones estan molt influenciats per les variacions en el camp de velocitats dels vents. Això induïx a molts errors en les previsions, especialment en la zona Nord-Oest del Mediterrani que com es podrà veure hi ha algunes situacions en les que les direccions de les ones, determinades per la descripció de la cubeta (veure apartat 3.2.2), no es corresponen a les direccions dels vents locals. Quan hi ha progressió d'un conjunt d'ones que s'ha generat lluny de la costa amb altres condicions de vent i no s'han vist afectades pels vents locals, s'està parlant de mar de fons o ones *swell*, i quan aquestes s'ha format prop de la costa, s'anomenen ones *sea*.

Les dades meteorològiques s'obtenen mitjançant la informació que es pugui recopilar en observatoris costaners juntament amb variables de les boies catalanes de la XIOM (Xarxa d'Instrumentació Oceanogràfica i Meteorològica). A partir d'aquí, es pot comprovar quin model numèric s'ajusta millor per a cada zona. Bolaños et al, (2008) indica que a la zona de Catalunya hi ha una bona compatibilitat amb els models WAM (*Wave Modelling Project*) (WAMDI Group et al., 1988), que s'utilitza en les previsions pel SMC (Servei Meteorològic de Catalunya), i SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) (Booij et al., 1999), més utilitzat en estudis de propagació d'ones. Els dos són sistemes àmpliament reconeguts que generen models d'espectre d'ona que solucionen l'equació de transport sense cap limitació en l'energia d'ona (WAMDI Group et al., 1988).

- (i) El model **WAM**, és el que utilitza la xarxa XIOM com a suport en la previsió de la generació/propagació d'onatge a aigües fondes. Un sistema que funciona per partida doble cada dia amb un horitzó de 36 h en una malla amb resolució de 18 km aproximadament. Aquest model està configurat per a la XIOM amb 24 direccions i 25 freqüències diferents. El sistema WAM es va desenvolupar als anys 1980s i s'ha anat actualitzant fins a la versió Cycle 4.5, una tasca de la qual s'encarrega la *Helmutz Association of German Research Centres* (Hasselmann et al, 1988). Aquest va ser el primer de la tercera generació de pronòstics d'ona, que permeten l'evolució de l'espectre de manera lliure. A banda de la XIOM també s'ha incorporat a altres xarxes com la ECMWF, on opera amb 36 freqüències i 36 direccions diferents de propagació, ja que és un bon ideal per a treballar a grans escales de característiques estacionàries com els oceans.
- (ii) El **SWAN**, desenvolupat per la *Delft University of Technology*, també és un model de tercera generació computa ones generades pel vent, aleatòries, no lineals i de cresta curta. Està ideat per a obtenir estimacions realistes en paràmetres d'ona sobretot en regions costaneres i aigües interiors com llacs i estuaris. Tot i això, també és útil en qualsevol situació on trobem un alt percentatge d'ones generades pel vent. Aquest model també s'utilitza sobre una malla de 18 km, però no té una activitat diària com el WAM sinó que roman apagat fins que es requereixi. El SWAN no està recomanat per a escales grans ja que el seu propòsit es la transició d'una zona oceànica i estacionària a una escala a nivell costaner. A part d'això, computa bé les

interaccions ona-ona en aigües someres (*triads*), però té algunes limitacions com la difracció que es pugui produir amb diferents longituds de cresta o els corrents induïts per ona.

### 2.3.1 Modelització d'altura d'ona

Les validacions dels models han sigut testades per a la zona de Catalunya amb resultats diversos per a una mateixa localització. En aquest cas s'han estudiat Tortosa i el Llobregat amb els mateixos horitzons (Taula 1).

	Hz	Tortosa		Llobregat	
	Horizon (h)	RMSE	SI	RMSE	SI
WAM	12	37	0,46	36	0,48
	36	57	0,71	57	0,72
SWAN	12	38	0,47	41	0,54
	36	40	0,50	39	0,52

**Taula 2.1.** Càlcul de l'error de mínims quadrats (RMSE) i l'índex de dispersió (SI) a Tortosa i al Llobregat.  
Font: Bolaños et al., 2008

A curt terme (12 h) el model WAM s'ajusta millor ja que la mitjana d'errors quadrats i l'índex de dispersió són inferiors. En canvi, el model SWAN funciona millor a llarg terme (36 h) segons les variables anteriors. Això pot ser causa de que les condicions inicials per SWAN són estimades per a cada comprovació en comptes de que vénen donades per la predicció anterior com a WAM.

Els errors en les prediccions d'onatges per a mars semitancats com el Mediterrani tendeixen a ser més alts que per a mars oberts i oceans. Això és conseqüència de que hi ha grans gradients i variabilitat en els camps de vents i ones. Aquests vents canviant segueixen interaccionant amb ones més antigues i per suposat no s'ha de deixar de banda la component bimodal.

Per prendre dades diàries i obtenir resultats a curt termini, la eina WAM ofereix un bon suport ja que l'ajust és el més precís que s'ha obtingut. Però per a propagar a escales més costaneres, la millor opció passa per utilitzar el model SWAN.

### 2.3.2 Inputs de vents

La complexitat en el camp de vents provoquen una freqüència més baixa de les ones *swell* a la que s'hauria d'esperar. Per a reduir aquest efecte, a Catalunya s'ha implementat el sistema MASS (*Meso-scale Atmospheric Simulation System*) (Bolaños et al., 2008) en el servei de meteorologia. El MASS és un model dinàmic de meteorologia desenvolupat en les últimes dos dècades per l'associació de *Truewind Solutions* i MESO, Inc. que simula les físiques atmosfèriques incloent la conservació de la massa, el moment i l'energia. Al tractar-se d'un model dinàmic, realitza simulacions de les condicions atmosfèriques d'alta resolució, en períodes de temps de pocs segons. Aquesta recopilació de dades permet reproduir mapes de vents molt

detallats amb informació sobre velocitats i densitats d'energia. És el que es coneix com a *WindMap*.

El MASS al Mediterrani es sustenta sobre una malla de resolució de 55 km i a la península Ibèrica es fa servir una malla més densa de 15 km. La resolució espacial es de vital importància ja que és una font principal que porta a molts errors, tant en models de vent com en models d'ona. A les posicions de les boies, apareixen alguns fenòmens locals que tenen un impacte considerable en els patrons dels vents. En el cas de la simulació de les ones del Nord-Oest, com que només es poden generar amb boies a l'interior del mar, es necessita una densitat de malla més alta que l'actual (Bolaños et al, 2008).

Les diferències en els models es produeixen sobretot a que fan servir diferents inputs de vents. En el WAM s'ha implementat perfectament el MASS en la generació de models de vent i això provoca el creixement de les de tipus sea que s'han format de manera recent. Per contra, com s'ha explicat en la introducció, el SWAN es basa només en velocitats mitges dels vents i en el coeficient d'arrossegament, tot i que igualment es pot complementar amb malles de vent d'altres resolucions (en aquest treball el model SWAN s'ha obtingut amb una modelització de vents de 9 x 9 km, veure apartat 5). Bolaños et al. (2008), va comparar les mostres de vents utilitzades pels dos models amb les del satèl·lit Quikscat (que actualment ja no està en servei) i va donar validesa a les estructures espacials dels vents modelats, tot i que hi havia certes zones on els resultats no es corresponien. Per a la majoria els punts costaners el model va retornar velocitats més altes que les reals, probablement a causa de que el factor de l'orografia no està computat correctament en un codi que es basa en dades atmosfèriques. En canvi, a l'interior del mar les velocitats resulten inferiors a les reals. Quan ens trobem en condicions d'interacció mar amb platja els errors augmenten per la confluència d'aquests factors que empitjora la complexitat del càlcul.

A la taula 2 es mostren els resultats lligats a l'estudi anterior de la modelització d'ones en les mateixes localitzacions mencionades. L'índex utilitzat en la comparació és l'anomenat BIAS, que s'utilitza habitualment en l'estudi de viabilitat d'algoritmes. Un BIAS alt en valor absolut indica que es perd més informació entre els valors computat i els obtinguts per observació i les modelitzacions. Els valors de BIAS negatiu indiquen que la velocitat de vents calculada és inferior a la que hauria de ser.

		Tortosa	Llobregat
	Horizon	BIAS	BIAS
WAM	12	-7,5	2,1
	36	-3,9	5,9
SWAN	12	-12	-12
	36	13,2	10

**Taula 2.2.** Càlcul de l'error BIAS en Tortosa i Llobregat. Font: Bolaños et al., 2008

Com es pot veure, els resultats a Tortosa tendeixen a un BIAS negatiu ja que la boia es troba més cap a l'interior del mar i per tant les velocitats computades son més

baixes. En aquesta localització també tenim valors BIAS més alts, això és perquè es troba a una zona més sensible a dispersions causades pels vents del Nord-Oest.

Comparant els dos models podem dir que el WAM fa servir una opció més sòlida en la modelització de vents, ja que com s'ha vist conté més dades amb l'eina MASS, perquè tots els valors BIAS són inferiors al seu homònim.

### 2.3.3 Modelització de tempestes

La ocurrència de característiques bimodals, confluència d'ones *sea-swell* té conseqüències especialment rellevants en situacions de tempesta. La resolució espectral de zones on hi ha aquest problema pot produir un segon pic que no està resolt correctament i, relacionat amb la transmissió de moments, el coeficient d'arrossegament pot ser que sigui superior al real. Això provoca que les ones *sea* del Nord-Oest experimentin un augment en altura quan hi ha presència de ones *swell*, cosa que no té sentit.

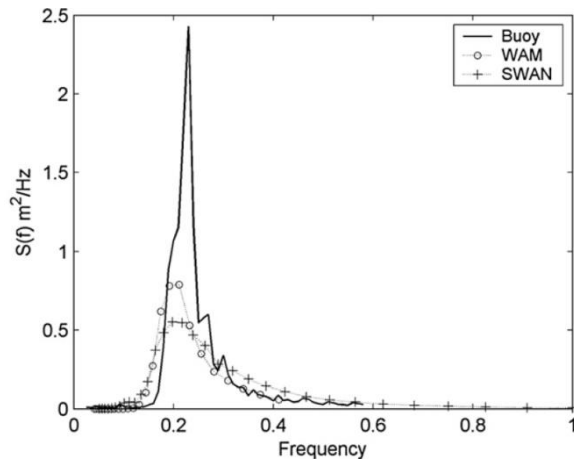
Un altre problema en ambdós models és que l'input de vents en aquest sistema operacional, es realitza amb intervals de 6 h. Aquesta configuració permet una bona caracterització de les situacions de temporal més severes (que tendeixen a ser més llargues) però hi ha pèrdua d'informació en tempestes amb un període de vida curt com les que es produeixen en la direcció Nord-Oest. Aquestes tempestes tenen una vida mitjana de 20 h, però poden arribar a tenir solament unes 12 h de vents intensos.

Per a comprovar quin dels dos models podia ser més precís en una etapa tempestuosa, Bolaños et al. (2007), va realitzar un estudi on s'estudiava el pronòstic que ajusta millor el pic real d'una tempesta. Es van comparar tres variables amb representacions espectrals (probabilístics): l'altura d'ona màxima, l'altura significant i l'energia. La descripció espectral d'un onatge permet obtenir informació ordenada i utilitzable d'observacions aleatòries i desestructurades com són els vents o els onatges. Aquestes descripcions s'utilitzen habitualment en el disseny d'infraestructura. Es ben sabut que tant l'altura màxima com la significant en condicions de tempesta, són paràmetres molt utilitzats en el disseny d'infraestructura portuària, però l'energia també es un factor que s'ha inclòs en molts estudis (Tozer i Durand, 2002; Monbaliu, 2003; González-Marco et al., 2004; Bolaños et al., 2005) com a base per a trobar unes condicions de contorn en una escala a nivell costaner.

- (i) A l'hora de produir l'**altura d'ona màxima ( $H_{max}$ )**, el model SWAN té una precisió més gran ja que detalla molt millor el creixement i decreixement del pic. Això augmenta en gran mesura l'ajust de la corba quan passa pel seu punt més alt. En els events extrems, els pics de tempesta són els més importants de capturar i això s'aconsegueix amb el SWAN (Sánchez-Arcilla et al., 2014).
- (ii) La variable de l'**altura significant ( $H_s$ )** durant una tempesta està ben definida pels dos models amb resultats similars en les prediccions tot i que apareixen certes discrepàncies en els resultats espectrals.
- (iii) Pel que fa a l'**energia**, el SWAN tendeix a donar valors inferiors en registres de baixa freqüència, i alts quan es treballa en freqüències

altes. Es per això, que el resultat energètic tendeix al balanç. Tot i que es produeix aquest cert equilibri, el canvi en el perfil realitza una estimació inferior del període mig. Segons Bolaños et al., 2008 el model WAM prediu millor la forma espectral energètica dels onatges forts. La figura 1 mostra la comparativa dels dos models en un gràfic d'espectre d'energia d'ona amb la obtinguda a la boia.

**Fig. 1** Espectre d'ona mesurada i computada per una boia del delta de l'Ebre. Es pot apreciar com el Model WAM ajusta millor el pic d'energia però amb un marge mínim. S'ha de destacar que cap dels dos models arriba a ajustar el pic amb molta precisió, això es perquè es treballa en aquesta zona difícil de predir.



Trobar una eina adequada per a la generació de temporals no és una tasca senzilla però sí que és importantíssim especialment en una zona com el Nord-Oest del Mediterrani (Gracia et al., 2014). Aquests factors que s'han descrit en aquest apartat com: la interacció del vent amb la topografia, la complexa component bimodal *sea-swell* i la influència dels contorns costaners; produeixen unes condicions de temporal molt aleatòries i difícils de reproduir. Però malgrat els *fetch* relativament curts no s'ha d'oblidar que el Mediterrani és capaç de generar perilloses situacions tempestuoses i catastròfiques.

Tenint en compte tots els punts analitzats es pot afirmar que el model més òptim per a aquest estudi és el model SWAN. La seva caracterització superior en els models d'un horitzó més llarg i una descripció més precisa dels events extrems fa que sigui la indicada en qualsevol projecte d'estudi de temporals en el Mediterrani com el que s'ocuparà (Pallares et al., 2014; Sánchez-Arcilla et al., 2014).



### 3. ÀREA D'ESTUDI

---

Catalunya és la zona d'Espanya que més ràpidament s'ha desenvolupat en termes d'explotació costanera durant els últims anys, un efecte que es tradueix en un augment del suport per a activitats humanes econòmiques, industrials i d'oci a la costa i a les seves immediacions. El 44% de la població catalana es concentra a les proximitats de la costa i a això se li afegeix la gran captació de turisme que es troba sobre una quarta part del total que entra a Espanya, el tercer país del món en recepció de turistes internacionals (Jiménez et al., 2008).

En aquestes últimes dècades, la influència urbana en les costes catalanes ha augmentat significativament i ha suposat un impacte en la dinàmica natural que dificulta el desenvolupament natural de les platges. En aquest temps més de 50 M€ s'han invertit en el manteniment o la construcció de nous passeigs marítims que limiten l'amplada de la costa i agreugen el problema d'aquesta invasió urbana a la platja (Guillen, 2008). Juntament amb això, es habitual trobar carreteres, vies de tren o altres infraestructures que voregen la platja al llarg de tot el litoral. Aquest problema s'accentua a la zona central, influenciada per la zona metropolitana de Barcelona, on hi ha la major part d'assentaments urbans costaners. A més a més, a Barcelona l'activitat econòmica de l'àrea ha generat uns entorns marítims fragmentats a causa de les diferents intervencions de protecció de la costa.

Juntament amb tots aquests inconvenients la desaparició pràcticament total dels sediments transportats pels rius provocada per una forta regulació dels caudals, ha provocat un canvi radical en el balanç natural que ha portat a una remodelació del pendent i la forma de les platges. Per pal·liar aquesta pèrdua continuada, els organismes costaners s'han vist obligats al manteniment artificial de les platges per donar suport al turisme i per conservar la primera defensa contra el mar. Una altra marca artificial en la morfologia costanera induïda per l'activitat humana.

#### 3.1 DESCRIPCIÓ GEOGRÀFICA

La costa catalana està localitzada al Nord-Est de la costa mediterrània espanyola compresa entre la frontera francesa al Nord i la Comunitat Valenciana al Sud (figura 3.1). Des d'una perspectiva geogràfica, el litoral català s'estén des del cap de Port Bou fins a la desembocadura del riu Sénia que marca la frontera Sud de Catalunya. (Jiménez et al., 2008). Consta de 356 platges distribuïdes en una longitud de costa aproximada de 700 km que es correspon a pràcticament la meitat de la resta de la costa espanyola en el seu contacte amb el Mediterrani (Bolaños et al., 2008).

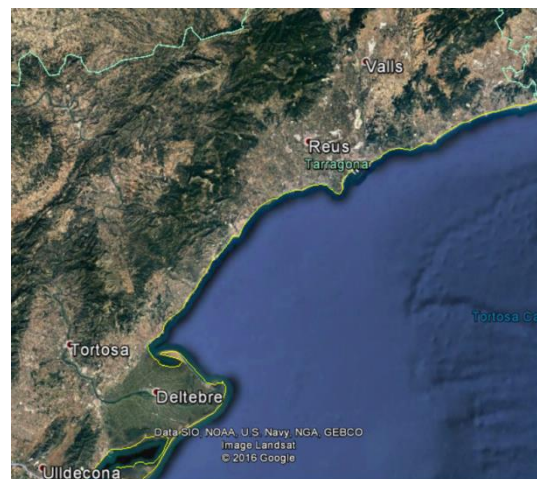


Figura 3.1 Localització de la costa catalana en el conjunt de la costa espanyola. Font: Google Earth.

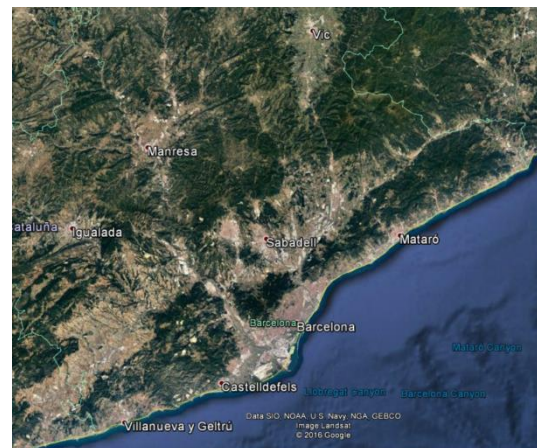
En aquest apartat s'exposen tres zones geogràfiques força diferents en la seva morfologia per recalcar la diversitat d'aquest territori i seguidament, es fa una descripció de la cubeta del Mediterrani occidental

### 3.1.1 Diversitat de la costa catalana

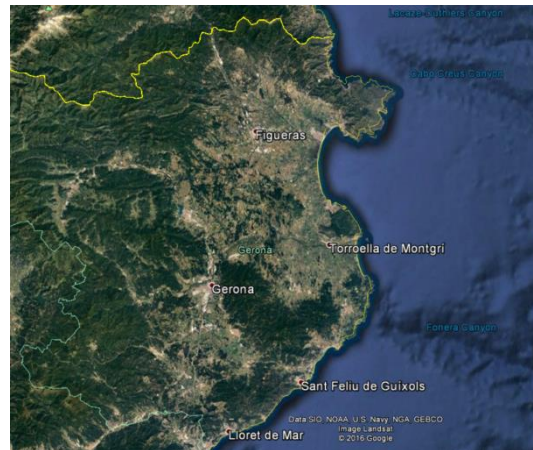
A) Al sud de Catalunya es troben les platges del Garraf, la **Costa Daurada** i el Delta de l'Ebre. Aquest sector es caracteritza per l'abundància de platges obertes i amples, sovint lligades a ports o espigons. També s'hi troben les platges més llargues, únicament al Delta, hi ha una extensió de 50 km de platges. En la zona del Garraf hi ha platges més petites amb algun que altre penya-segat de roca calcària.



B) Seguidament es troba el sistema central de **Barcelona-Maresme**. En aquesta zona destaca la gran quantitat de platges artificials, el port de Barcelona de més de 15 km, el delta del riu Llobregat al Sud amb 18 km de platja i la costa del Maresme, que és una platja contínua de 40 km de llarg, que s'ha format sobre roques granítiques, amb algun que altre port o espigó.



- C) Per últim es troben platges i penya-segats de la **Costa Brava** al Nord que limiten amb la part més oriental dels Pirineus. Són característiques el gran nombre de platges petites i rocoses, que s'han desenvolupat a partir de formacions granítiques i metamòrfiques. A part d'això, també s'han format plans costaners al·luvials compostos per sediments aportats pels rius Fluvià, Ter i Muga.



En termes mitjans, les costes de Catalunya són aproximadament de 37m d'ample, compostes en la seva majoria per arena amb una mida de gra mitja de 0,7mm i una pendent major de 1/10 (CIIRC, 2010). Al llarg del fons marí proper a la costa es descriu una batimetria irregular amb zones de canyons submarins que aporta complexitat a l'estudi de l'onatge amb variacions no previstes en diversos punts de control (González-Marco et al., 2004).

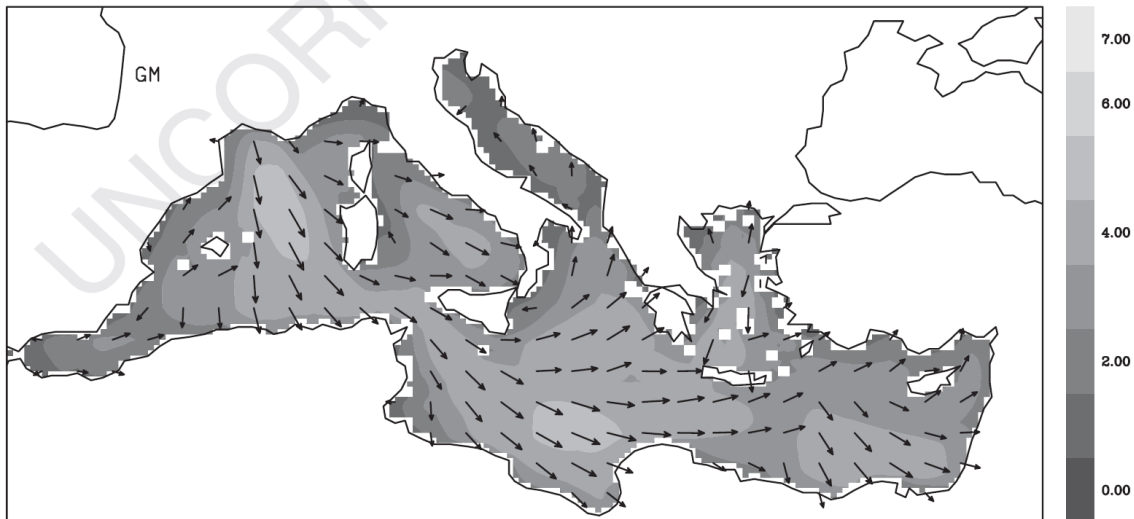
### 3.1.2 La cubeta del Mediterrani occidental

Com que aquest és un estudi més oceanogràfic que geogràfic o geològic és convenient descriure la zona marítima que actua sobre el litoral català. El Mediterrani occidental presenta diversos sectors o subdivisions de les quals es fa referència en els següents apartats com són el Golf de Lleó, el mar de Gènova o el mar Balearic. Tots aquest sectors són importants per a la costa catalana, ja sigui per contacte directe o en la formació de ciclons i en el desenvolupament de tempestes.

Per a poder explicar correctament els patrons que formen les ones generades pel vent, primer s'ha d'explicar la zona d'estudi en termes de *fetch*. És assumible que les ones més grans són produïdes pels vents més forts, però a part de necessitar aquestes dades meteorològiques en l'estudi de ondulacions a la superfície del mar, també intervé la distància que recorren les ones sota l'efecte dels vents. Aquesta distància és el que es coneix com a *fetch* (Codrington, 2005).

Quan les ones abandonen la zona en que s'han generat, comencen a viatjar lliurement i formen perfils similars amb crestes més llargues. L'altura de les ones tendeix a un màxim amb la combinació d'un vent fort i un llarg *fetch*, que es localitza cap al final del recorregut en la direcció del vent (Lionello et al., 2006). Un exemple es veu a la figura 3.2 on s'ha fet una recopilació de les Hs més altes utilitzant la ERA-40 *re-analysis*. Es pot apreciar que les ones més altes del Mediterrani es troben a la part occidental, on actua el Mestral amb un llarg recorregut per davant.



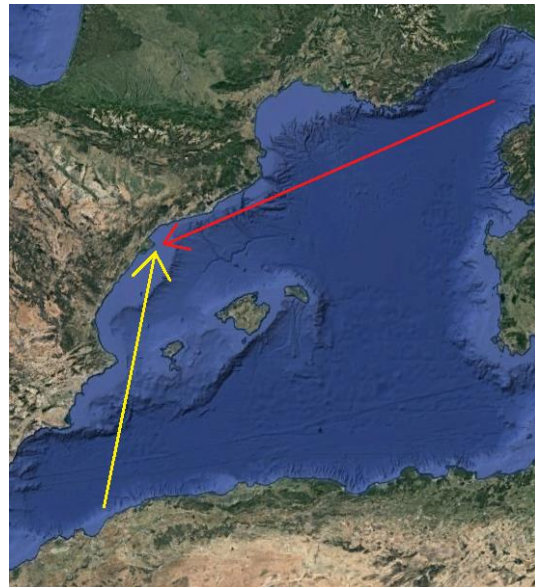


**Figura 3.2** Distribució de les màximes  $H_s$  en tot el Mediterrani. Les fletxes indiquen la direcció en mitjana dels màxims, realitzat a partir del ERA-40. Escala en metres. Font: Lionello et al, 2006

En el Nord-Oest del Mediterrani els *fetch* són relativament petits. Còrsega, Sardenya, les Illes Balears i fins i tot Sicília limiten les distàncies que recorren les ones fins a Catalunya. Per a cada sector que s'ha tractat anteriorment en la descripció geològica, es troben diferents distàncies de *fetch*. Com es podrà veure més endavant en aquesta secció, gràcies a les dades de la XIOM en l'estudi de Sanchez-Arcilla et al. (2008), la majoria d'ones provenen de l'Est exceptuant el sector de la Costa Brava on són més recurrents les ones del nord. Tenint en compte aquesta afirmació s'han intentat destacar quines distàncies poden ser susceptibles no ja per la disponibilitat d'espai sinò per la probabilitat que se li pot donar a un recorregut.

En les següents imatges i distàncies, que han sigut preses mitjançant el programa *Google Earth*, es vol destacar les principals direccions de les ones en termes de recorregut i aflluència.

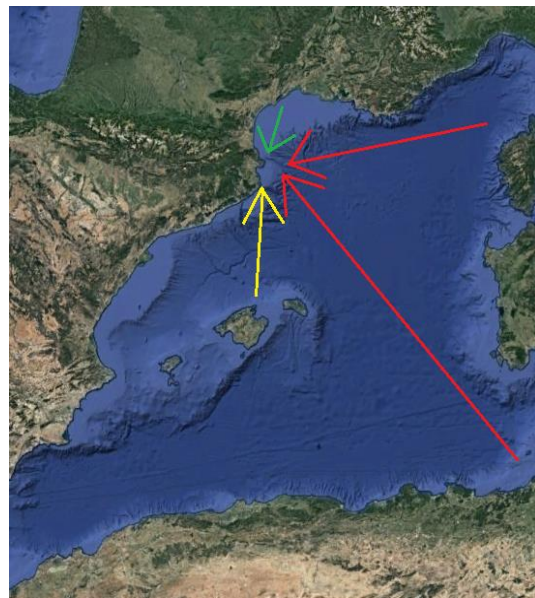
**A) Costa Daurada.** El sector més al sud de Catalunya és on es troba un dels *fetchs* més grans. La majoria de distàncies de *fetch* provinents de l'Est tenen un recorregut d'uns 600 km, però agafant un punt arbitrari del golf de Gènova fins al Delta de l'Ebre (fletxa vermella) poden arribar a tenir un *fetch* de 700 km. Des del Sud no hi ha tanta aflluència d'ones però aquestes poden arribar a tenir un *fetch* de 400 km (fletxa groga). La resta de direccions estan limitades per les Illes Balears.



**B) Barcelona-Maresme.** Al centre de la costa catalana els recorreguts d'ona des de l'Est són més curts comparats amb els del Sud. Tant des del golf de Gènova com des de Sardenya els *fetch* més grans poden assolir uns 500 km (fletxes vermelles). El traçat de les platges no permet l'arribada d'ones del Nord-Oest, al menys en la part de Llobregat. Des del Sud es poden formar recorreguts interessants de fins a 600 km (fletxa groga).



**C) Costa Brava.** El possible recorregut d'una ona des de les proximitats de la costa de Tunísia fins a la Costa Brava és aproximadament de 700 km. Però aquesta direcció no té molt bona correspondència amb el Mestral. Des del golf de Gènova i des de les illes Balears als sud es dibuixen distàncies de 400 km i 200 km respectivament (fletxes grogues i vermelles). És l'únic sector amb un *fetch* des del Nord, que arriba des del Golf dels Lleons fins al Cap de Creus que té uns 100 km (fletxa verda).

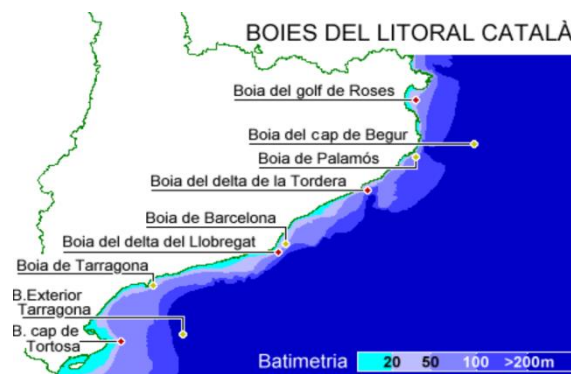


Després d'analitzar totes les possibles distàncies es podria afirmar que les ones més altes arriben al Delta de l'Ebre, almenys en termes de *fetch*, ja que de totes les direccions esperades, com són les compreses entre el Sud i l'Est, aquest recorregut de 600 km és el més gran. Però ara s'ha de tenir en compte també la correlació amb els vents i l'activitat sinòptica.

### 3.2 DISPONIBILITAT DE DADES

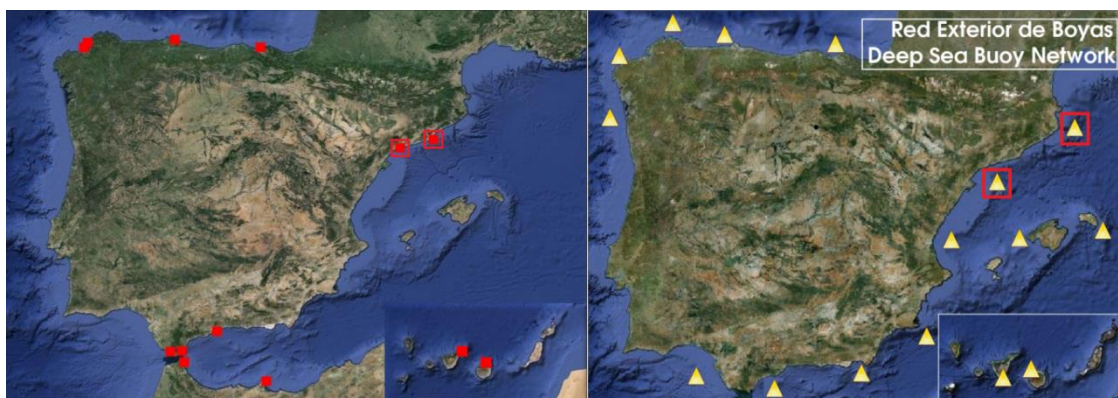
La importància d'aquesta regió en termes de recursos costaners fa que sigui una de les més instrumentades de l'estat espanyol. Per a la realització d'aquest apartat s'han utilitzat les dades recopilades per la XIOM i l'entramat de boies i sistemes costaners que conformen les bases de dades de Puertos del Estado.

La XIOM és propietat de la Generalitat de Catalunya i la seva gestió correspon al Departament de Territori i Sostenibilitat, Ports de la Generalitat, la Universitat Politècnica de Catalunya i el Servei Meteorològic de Catalunya. Aquesta xarxa constava (va deixar de funcionar el 2013) de nou elements: tres boies direccionals, una boia escalar, dos mareògrafs i tres estacions meteorològiques. Totes les boies són costaneres i estaven situades al llarg del litoral: a Roses, a Tordera, al delta del Llobregat i al Cap de Tortosa (figura 3.3). Com a resultats aquestes boies ofereixen dades en forma d'estadístics i d'espectres d'onatges. Els mareògrafs estaven situats a l'Ampolla i Sant Carles de la Ràpita i ofereixen dades històriques de les fluctuacions en el nivell del mar. Les tres estacions meteorològiques, localitzades al delta de l'Ebre: a l'Ampolla, Sant Carles i Deltebre, ofereixen dades de pressió, temperatura i vents.



**Figura 3.3** Boies de la costa catalana. Les boies que pertanyen a la XIOM són: Cap de Tortosa, Delta de Llobregat, Tordera i Golf de Roses. La resta pertanyen a Puertos del Estado. Font: SMC.

La XIOM es complementava amb la xarxa de Puertos del Estado que està supervisada per l'autoritat nacional de ports a Espanya i consta d'un entramat d'instruments distribuït al llarg de tota la costa del país. A Catalunya s'hi troben dos boies profundes, quatre boies costaneres, tres estacions meteorològiques i un mareògraf. Les quatre boies costaneres es localitzen a Tarragona, Barcelona i Palamós i formen part de la xarxa REDCOS (Red Costanera). A Barcelona s'hi troba una boia escalar i una direccional mentre que les altres són direccionals. Les boies profundes, que estan en el conjunt de REDEXT (Red Exterior), localitzades a Tarragona i Begur (figura 3.4) registren velocitats i espectres de vents, pressió atmosfèrica i característiques de les corrents marines. Les estacions meteorològiques estan repartides entre Barcelona i Tarragona i el mareògraf es troba a Tarragona.



**Figura 3.4** Localització de les boies costaneres (imatge esquerra) i profundes (imatge dreta) repartides per Espanya. S'han ressaltat les boies que es troben a Catalunya. Font: Puertos del Estado.



El producte de les observacions realitzades per tota aquesta instrumentació es transforma en el conjunt de series temporals de paràmetres de vent i onatge que han sigut computats numèricament i que conformen la malla **SIMAR**. Actualment les sèries dels nodes SIMAR també contenen amb les dos bases de dades que ha utilitzat Puertos del Estado històricament: SIMAR-44 i WANA. Amb això es busca oferir uns models numèrics tan extensos com sigui possible en el temps. Un objectiu que ha sigut possible gràcies al remodelat numèric d'alta resolució d'atmosfera, nivell del mar i onatge en tot el litoral espanyol. D'aquesta manera, el model actual compta amb registres que daten des del 1958 i, a més, ofereix una cobertura ampliada tant en el Mediterrani com a l'Oceà Atlàntic.



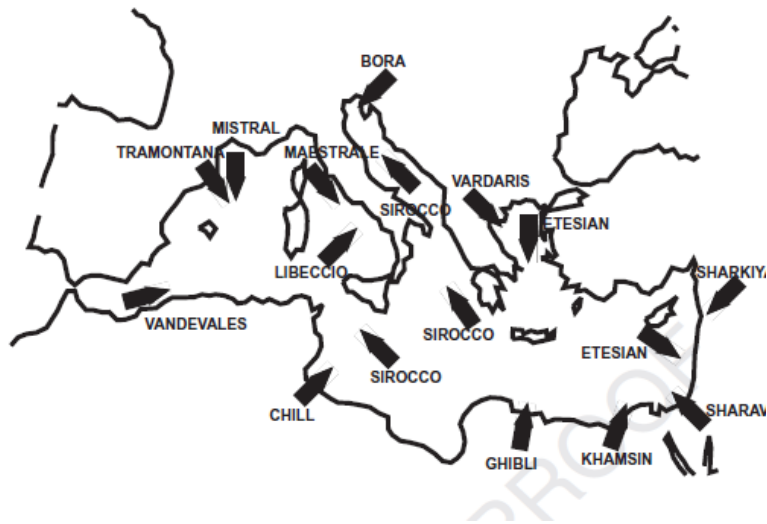
**Figura 3.5** Mostra dels nodes SIMAR al Mediterrani occidental. Es pot apreciar que a les proximitats de la costa la densitat de punts és molt alta. Font: Puertos del Estado.

Tot i aquesta amplitud del servei, s'ha de tenir en compte que SIMAR-44 i WANA són subconjunts diferents fusionats que utilitzen models atmosfèrics i oceanogràfics generats de reànlisis distints.

- (i) La contribució de dades per part de SIMAR-44 va ser durant el període 1958-1999 i es tracta d'un sistema de predicció meteorològica d'alta resolució d'atmosfera, nivell del mar i onatge. Per a la simulació de la meteorologia i l'onatge al llarg del Mediterrani, la base SIMAR ha integrat registres del Projecte Europeu HIPOCAS (*Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe*).
- (ii) Les series WANA han sigut desenvolupades en un projecte conjunt per Puertos del Estado i AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). S'ha de tenir en compte que les dades WANA no són de predicció sinó que proporciona camps de vents i onatges consistents amb l'evolució dels paràmetres i amb les observacions realitzades. És important també que les series temporals que s'han anat afegint al llarg del temps no són homogènies sino que es van modificant de manera periòdica per a introduir millores. Això ha permès augmentar la resolució espacial i temporal.

### 3.3 PATRONS METEOROLÒGICS DELS VENTS

El vent és un dels factors principals relacionat amb la formació i propagació d'ones de superfície, corrents i processos biològics. El camp de vents de la costa catalana està altament influenciat per la orografia local i en mitjana es caracteritza per vents amb velocitats baixes i mitjanes. Tot i això, podem trobar forts vents associats a situacions tempestuoses com els ciclons que tendeixen a aparèixer a la regió de Gènova.



**Figura 3.6** Localització i direcció dels principals vents a la regió del Mediterrani. Font: Lionello et al. 2006.

Dos exemples són el Mestral i la Tramuntana, els dos vents amb l'impacte més en el Nord Oest del Mediterrani (figura 3.6). Aquests vents són considerats vents locals, és a dir, apareixen en les mateixes zones i presenten característiques similars (Sánchez-Arcilla et al., 2008).

#### 3.3.1 Direccionalitat i característiques dels vents

Les dades de vents dels Mediterrani en el conjunt SIMAR-44 s'han obtingut mitjançant el model atmosfèric REMO (un model regional desenvolupat per l'institut Max-Planck de previsió meteorològica), que s'ha format a partir del reanàlisi global NCEP. Aquest model està integrat a una malla de 50 km de resolució, amb comprovacions periòdiques que es van realitzar cada 5 min. La modelització dels vents amb la sèrie WANA utilitza el model atmosfèric HIRLAM que ara mateix conta amb una resolució espacial de 3 km i amb una resolució temporal horària.

El reanàlisi NCEP assimila les dades instrumentals de la xarxa REDEXT i la xarxa REMPOR, les boies costaneres no ofereixen dades meteorològiques. Les boies exteriors de la REDEXT registren dades a nivell horari. Aquestes poden ser mesures que venen donades en observacions de 10 min, és a dir, els resultats generats cada hora estan calculats per una mitja en un període de 10 min. La quantitat de dades portuàries en canvi són molt més escasses que les de l'entramat de boies, es centren en obtenir valors mitjos, màxims i direccionals.

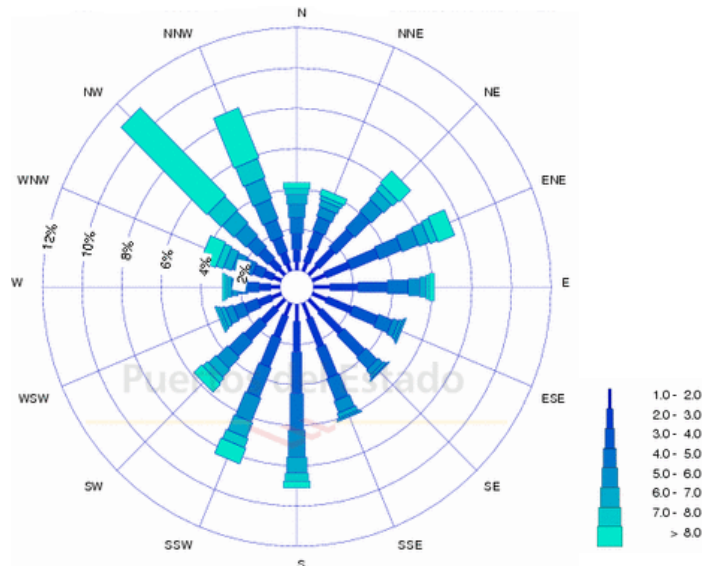


A causa de la baixa resolució de la malla durant el període SIMAR-44 no és possible reproduir correctament l'efecte d'alguns accidents orogràfics. Això provoca que alguns vents d'escala local que provenen de l'interior no puguin quedar ben modelats. Però no és el cas del Mestral i la Tramuntana.

Es destaquen 4 direccions principals per als vents forts en la regió: NE, E, SO i NO. D'acord amb Del Amo (2000), les velocitats més altes que s'han registrat són de la direcció E. Una afirmació que és consistent amb la correlació que hi ha amb els ciclons de Gènova. Però en general hi ha força diversitat en el camp de vents, especialment quan es compara la zona del delta de l'Ebre amb la resta del litoral.

#### A) Delta de l'Ebre:

El camp de vents present al delta de l'Ebre es caracteritza per altes velocitats en la direcció Nord-Oest a causa de l'acció orogràfica que exerceix la vall del riu Ebre, aquest vent es coneix amb el nom de Mestral. El Mestral està present en episodis curts la major part del any i especialment durant les estacions de la tardor i l'hivern. Segons Font (1990) en un estudi de 4 anys, les velocitats mitges més altes d'aquest vent van resultar ser aproximadament de 10m/s. En la figura 6 es mostra la direccionalitat dels vents en una rosa dibuixada a partir de les direccions mitges de les dades recopilades a Puertos del Estado en un punt SIMAR situat dintre el mar pròxim al Delta. L'interval de temps escollit ha sigut de 1958-2016 per agafar la màxima representació possible. Es pot apreciar clarament que la component principal és la del Nord-Oest en termes de velocitat i de quantitat de registres. Com aquest punt es troba dintre el mar, també es pot veure que els vents de l'Est tenen força presència.

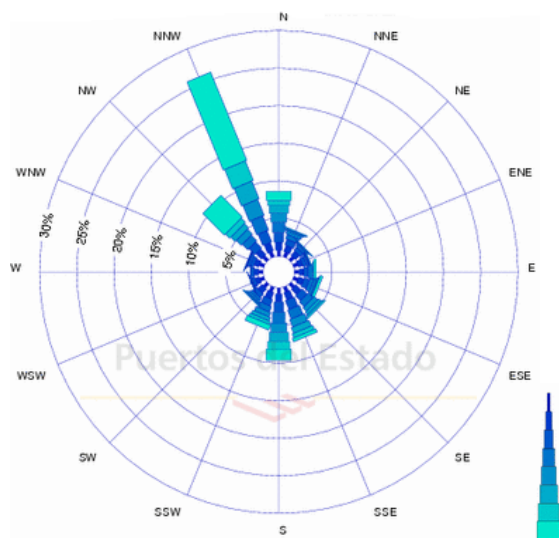


**Figura 3.7** Rosa de vents d'un punt dintre el mar prop del Delta de l'Ebre (Punt Simar 2096126). Escala amb m/s. Font: Puertos del Estado.

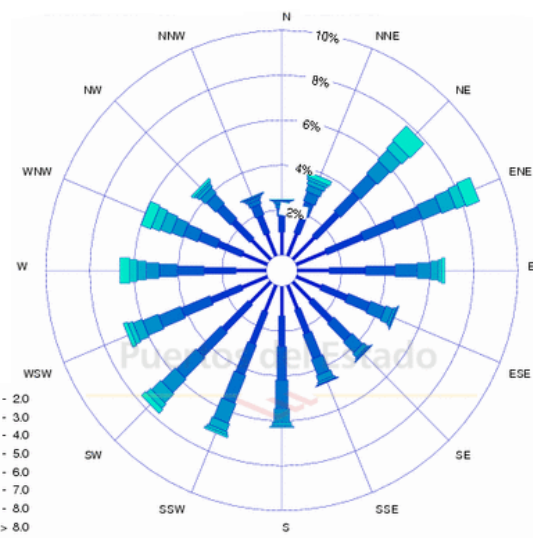
## B) C) Barcelona i la Costa Brava:

El camp de vents a la part de la Costa Brava es caracteritza per un predomini de la direcció Nord, un efecte produït pels Pirineus (Jansà, 1997). Aquesta situació crea un dipol orogràfic que afavoreix la generació de vents de l'Est a la part central de la costa.

Les figures 3.8 i 3.9 mostren les roses de vents a la Costa Brava i a Barcelona. Uns resultats extrets a Puertos del Estado utilitzant el mateix període que abans (1958-2016). En la primera imatge destaca la presència que té el vent del Nord, tant és així que fa que les altres direccions es puguin considerar pràcticament insignificants. Aquest vent és la Tramuntana i sempre arriba amb força des del Nord després de travessar la zona dels Pirineus. A la imatge de la dreta, vegem els resultats de la part central de la costa amb una distribució més heterogènia (figura 3.9). Això es causa de la variabilitat que produeixen els períodes estacionals en aquest sector. A part de la component Est que està present tot l'any, els vents predominants durant el Desembre i el Gener són del Nord-Oest. Durant els mesos de Febrer, Març, Abril i Novembre els vents del Sud i de l'Est són més forts (Del Amo, 2000).



**Figura 3.8** Rosa de vents a un punt dintre el mar a la Costa Brava prop del cap de Creus. (Punt Simar 2124148). Font: Puertos del Estado.



**Figura 3.9** Rosa de vents a un punt a dintre el mar prop de la costa de Barcelona. (Punt Simar 2110135). Font: Puertos del Estado.

L'escala de velocitats de totes les roses de vents que s'han presentat és la mateixa però s'ha de tenir en compte que en els registres que s'associen al Mestral i la Tramuntana aquests no es limiten a 8 m/s. Aquests vents poden arribar a superar els 60 m/s. No es d'estranyar que siguin els vents amb més influència meteorològica de la zona.

Per a poder establir millor una correlació entre els vents i les ones que arriben a la costa catalana, s'utilitzaran els mateixos punts SIMAR en la generació de les roses d'ones i en les roses de vent. Està comprovat que quan apareixen ones que vénen de l'Est, la correlació es més bona amb les dades de vents obtingudes dintre el mar i quan tenim vents del Nord-Oest la correlació millora amb dades recopilades a terra.

### 3.4 PATRONS OCEANOGRÀFICS

L'onatge que genera el vent és un dels factors més importants en els entorns costaners a causa de: l'impacte físic, la transferència de moment en la interacció mar-aire i la incidència que té en el transport de sediments (Jiménez et al., 1996; Bolaños et al., 2005).

A la costa catalana trobem unes particularitats que determinen les característiques de les ones. En primer lloc està la cubeta, que com s'ha explicat anteriorment, aquesta presenta un *fetch* màxim de 600km. Altres factors intrínsecs són la heterogeneïtat en el camp de vents en temps i espai relativament petits; i la complexa batimetria amb pendents pronunciades prop de la costa. Amb aquestes condicions es pot parlar d'un clima torrencial, on es produeixen situacions de tempesta discontinues i molt fortes a nivell energètic, que es produeixen majoritàriament d'octubre a maig, i que no tenen res a veure amb els períodes de calma que són presents la major part del temps. Els forts onatges causats per les tempestes també estan limitats per la cubeta de 600 km i això crea situacions mixtes en el mar amb més d'una direcció mitjana d'ones i més d'una freqüència de pic en cada punt de control (Sánchez-Arcilla., 2008).

#### 3.4.1 Direccionalitat de l'onatge

Per a generar els camps d'onatge, la sèrie SIMAR-44 fa servir el mode numèric WAM, que és un dels més utilitzats en oceanografia tant per la XIOM com per Puertos del Estado (veure apartat 2). Les dades s'obtenen amb una cadència horària i la resolució de la malla al Mediterrani es variable: 25 km per a la part més oriental i 12,5 km conforme es va apropant a la costa catalana. El model WAM també s'aplica a la sèrie WANA amb una resolució espacial molt bona per al Mediterrani de 5 km, sent la temporal de 1h.

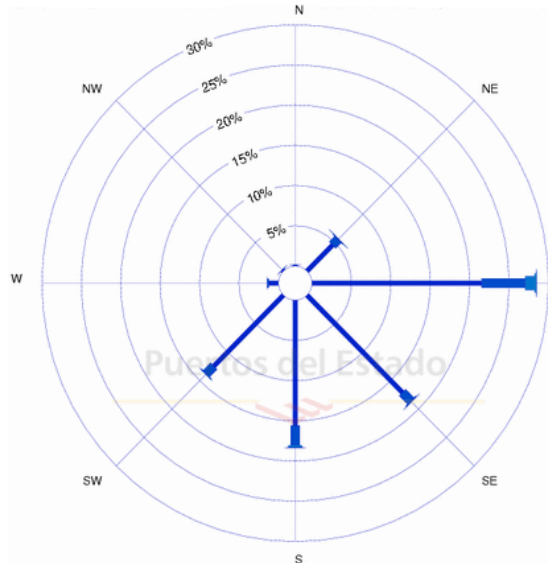
Les boies que conformen la REDCOS prenen mesures horàries tot i que històricament no sempre s'ha complert aquesta freqüència. Actualment el funcionament es similar a la recopilació de dades de la REDEXT, que en el cas dels onatges les duracions de les mesures són de 30 min per a després poder realitzar les mitges pertinents. Per a les boies costaneres els intervals són de 24 min per a prendre dades en boies direccionals, i 40 min per a prendre dades en boies escalars. Aquestes diferències en el temps de mostra no generen paràmetres diferents, excepte quan es

Amb totes aquestes dades històriques que facilita Puertos Estado es pot realitzar una mitja de les direccions que pren l'onatge en cada sector de la costa. A més a més, s'han identificat algunes característiques genèriques que pren l'onatge a Catalunya.

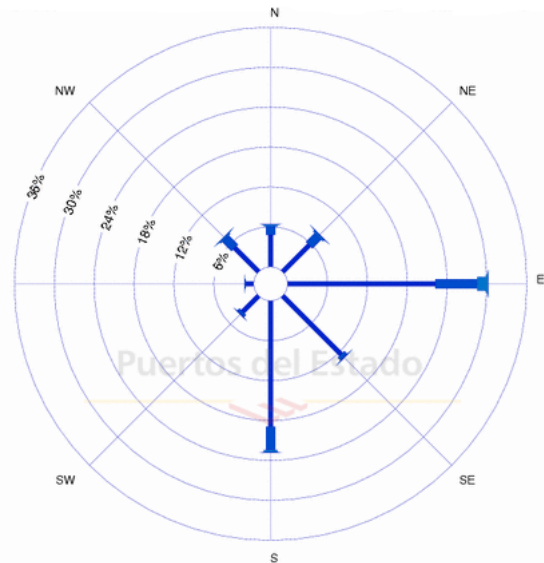
##### A) Delta de l'Ebre:

Al delta de l'Ebre vegem un predomini de les direccions Est i Sud (figura 3.10) que a més són les que corresponen a les ones més grans en termes de Hs, però també hi ha registres de més direccions. Això es correspon amb les direccions del

*fetch* més gran i amb l'activitat ciclònica que es produeix en aquella direcció. En un punt dintre el mar en aquest sector s'aprecia l'efecte del Mestral en la generació d'ones des de la direcció Nord-Oest (figura 3.11).



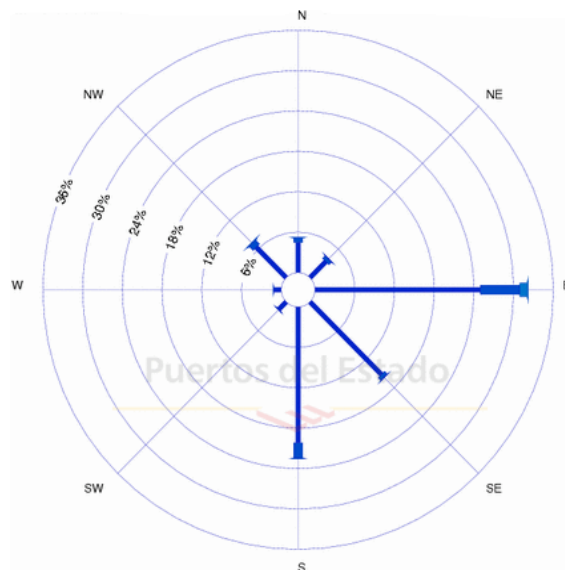
**Figura 3.10** Rosa d'ones d'un punt prop de la platja dels Eucaliptus al delta de l'Ebre. Direccions mitjanes d'onatges entre 1958-2016. (Punt SIMAR 2095128). Font: Puertos del Estado



**Figura 3.11** Rosa d'ones d'un punt a l'interior del mar al delta de l'Ebre. Direccions mitjanes d'onatges entre 1958-2016. (Punt SIMAR 2096126) Font: Puertos del Estado

## B) Barcelona-Maresme:

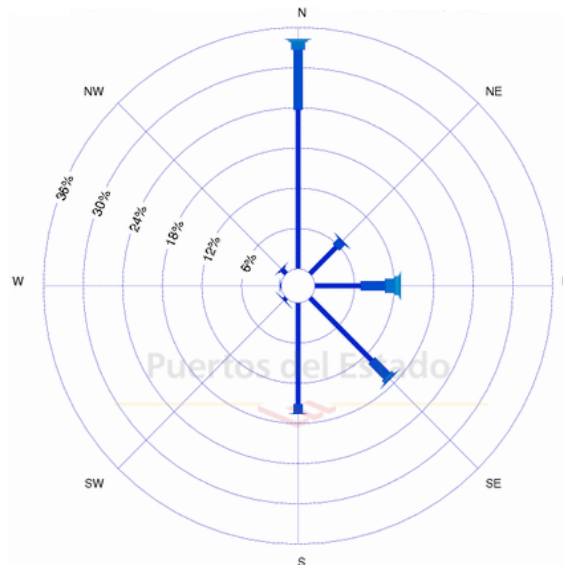
A la part central de la costa, Barcelona, es pot veure que el rang de direccions està limitat pel Sud i per l'Est. No es poden destacar més registres perquè el tal com s'explica en la descripció de la cubeta, la orografia no ho permet. Les ones que puguin venir del Nord-Oest arribaran a alguna platja del Maresme i cap al Nord (Figura 3.12).



**Figura 3.12** Rosa d'ones d'una boia prop de la platja a Barcelona. Direccions mitjanes d'onatges entre 1958-2016. (Simar 2110135).

### C) Costa Brava:

En aquest sector de la costa, la direcció que recull més ones és la del Nord. Es pot veure la importància que té aquest petit *fetch* de 100 km, sobretot perquè es correlaciona amb la Tramuntana. Les altres direccions també són també recullen registres interessants, com l'Est i el Sud-Est, probablement perquè en aquesta direcció les ones gaudeixen de molt recorregut, però no tenen tanta intensitat com les del Nord (figura 3.13).

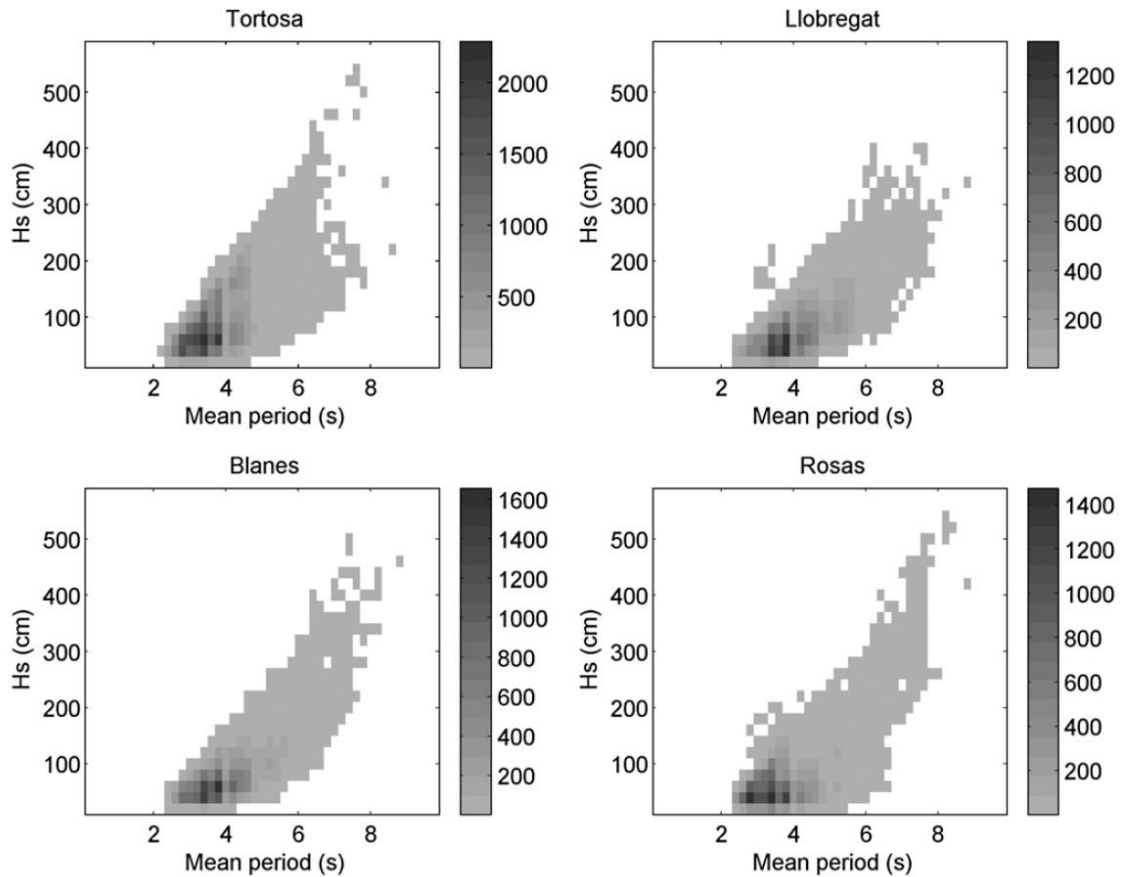


**Figura 3.13** Rosa d'una boia a l'interior del mar de la Costa Brava prop del Cap de Creus. Direccions mitjanes d'onatges entre 1958-2016. (Simar 212148).

### 3.4.2 Característiques d'onatge

Per a caracteritzar l'onatge de Catalunya s'ha volgut fer servir les dades de la XIOM. En termes generals, agafant una mitja de totes les dades obtingudes al llarg de la costa, l'altura significant mitja d'ona anual ( $H_s$ ) *offshore* és de 0.7 m amb un període de 7s.

Analitzant aquestes dades en cada boia de la XIOM podem veure certes diferències entre les parts controlades. Especialment interessant és el delta de l'Ebre on hi trobem el *fetch* més llarg des de l'est i no està tant limitat com la resta de la costa i admet una distribució més gran de resultats. Bolaños et al. 2008 demostra, en un estudi de mesures d'altura significant d'ona ( $H_s$ ) i del període mig ( $T_z$ ), que el delta de l'Ebre presenta un interval de  $H_s$  més variat, entre 1 i 5 m, en un  $T_z$  de 7s. Per a la resta de boies, la major part de  $H_s$ , inferior a 1 m, es concentren entre 2-4 s (Figura 3.14).



**Figura 3.14** Gràfica Hs-Tz de les quatre boies de la XIOM. Les parts més ombrejades indiquen més densitat de punts (Bolaños et al., 2008).

A part del comportament dels vents i la forma de la cubeta a Catalunya apareix un altre factor que determina les característiques de les ones. Les propietats espectrals de les ones estan afectades per mars bimodals, aquells que combinen condicions de *swell* amb *sea*. Aquestes característiques juntes en un mar bimodal modifiquen les propietats físiques, de creixement d'ones i de distribució Hs i Tz al llarg del temps i a més té una alta influència en ones generades per tempestes. Un exemple d'això és el delta de l'Ebre que com s'ha estudiat, té una component *swell* per l'Est i una component *sea* pel Nord-Oest amb el Mestral. Un 53% de tot l'espectre d'ones d'aquest sector presenta un domini bimodal.

### 3.5 ESDEVENIMENTS EXTREMS.

Una tempesta és una pertorbació atmosfèrica violenta que sempre ve acompanyada de forts vents. Quan es forma al mar, una de les conseqüències més immediates és l'increment en l'altura d'ona i, fins i tot, un increment del nivell del mar (Mendoza et al. 2011). Les conseqüències d'una intensa activitat tempestuosa poden anar des de un augment en el rati d'erosió de les platges fins a pèrdues catastròfiques en infraestructura i ecosistemes costaners.

Per identificar una tempesta, múltiples autors (Lozano, Mendoza, Jiménez, etc.) han optat per establir un llindar en la altura significant d'ona de 2 m. Aquest mètode

s'anomena *Peak Over Threshold* (POT). Quan la  $H_s$  supera aquest llindar en un període mínim de 6 h s'identifica l'esdeveniment com a tempesta. Aquests marges mínims van ser establerts per Mendoza i Jiménez (2006) perquè es corresponen a una situació que pot generar un impacte significatiu sobre la costa.

Es possible que puguin aparèixer dos pics d'alta intensitat en un interval de temps relativament curt. Si aquestes situacions es donen en un període inferior a 72 h i entre aquests esdeveniments la  $H_s < 1,5$  m durant un temps màxim de 6h, es considerarà que es tracta de la mateixa tempesta amb dos pics bessons (Mendoza i Jiménez, 2006).

### **3.5.1 Tempestes a Catalunya**

Les situacions extremes es poden produir per una quantitat innumerable de factors meteorològics, però es pot destacar un patró que es tendència en la generació de tempestes. En el cas de Catalunya, la seqüència es desenvolupa a partir d'un centre d'alta pressió a l'Atlàntic Nord o a les Illes Britàniques. Aquesta formació des del Nord genera fluxos de vents en direcció a Catalunya des del Mediterrani, acompanyats de l'entrada d'aire fred a un nivell de 500 hPa. La massa d'aire fred es concentra cap als sud de la península Ibèrica i produeix un centre de baixa pressió al Mediterrani Occidental que es desplaça des del sud de les Illes Balears fins al Golf de Gènova. El cicló sumat als vents que s'han generat augmenten la intensitat de les ones en direcció a la costa catalana. Els gradients de pressió entre l'anticicló del Nord i la borrasca del Sud determinen els pics de les tempestes (Sánchez-Arcilla et al., 2008).

Els patrons descrits pels ciclons en el Mediterrani ha sigut un tema molt estudiat en el treball de Lionello et al. (2006). La conducta més habitual és que en el Mediterrani occidental predomini la ciclogènesi i en la part oriental, la ciclòlisi. La formació de ciclons es tan intensa que durant els mesos d'hivern hi trobem la concentració més alta del món.

El comportament dels ciclons està altament relacionat amb l'estacionalitat de les tempestes. Autors com Bolaños i Mendoza coincideixen en que el període més intens a nivell sinòptic és d'Octubre a Maig i la resta de l'any es troba en una calma relativa. És cert que poden aparèixer tempestes als mesos d'estiu però amb una freqüència molt baixa i de menor valor energètic.

El nombre mitjà de tempestes que es formen durant l'any es situa sobre 10 tempestes en boies que es troben dintre el mar (Lin-Ye et al., 2016). Però amb dades registrades a la costa, aquest nombre disminueix fins a 5. Tot i aquesta quantitat relativament petita, s'ha de dir que aquests esdeveniments poden arribar a generar condicions de vents molt forts i ones molt altes que provoquen situacions catastròfiques. En condicions de tempesta s'han arribat a mesurar altures significants fins a 7 m (amb altures màximes de 10 m) i amb períodes de 13 s.

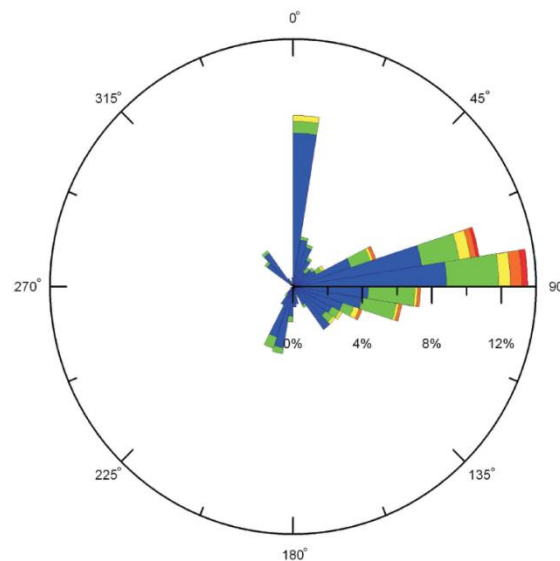
### **3.5.2 Direccionalitat**

Com s'ha mencionat, a Catalunya les fortes onades derivades d'una tempesta es generen principalment a causa de dos factors: el centre d'alta pressió que es troba a les Illes Britàniques i a l'Atlàntic, que produeix forts vents de l'est i del nord-est; i la

ciclogènesi que es produeix en front de la costa i que també genera forts vents de l'Est (Cateura et al., 2004).

Mendoza et al. (2011) reforça la importància de la direcció Est amb un estudi realitzat a la costa catalana que mostra la distribució direccional de les ones generades per tempestes. Utilitzant les dades recopilades de 5 boies direccionals al llarg de tota la costa en el període de temps de 1988-2008, es van identificar 599 events extrems amb els criteris definits anteriorment. S'ha de tenir en compte que molts d'aquests registres poden pertànyer a una mateixa tempesta ja que aquesta pot generar ones que siguin detectades en diferents zones i sovint, amb diferents característiques.

La figura 3.15 mostra els resultats d'aquest estudi i es pot comprovar que les direccions son similars als comportaments dels onatges habituals. És veu clarament la gran quantitat de registres que es prenen de la direcció est. El 57% dels events extrems detectats són d'aquest sector i, a més a més, també és la direcció on es corresponen les tempestes més intenses. També s'ha de destacar el nombre de tempestes que venen des del nord. Aquestes es concentren en la seva majoria a la Costa Brava i bàsicament són generades pels forts vents que venen condicionats pels Pirineus (Lin-Ye et al., 2016).



**Figura 3.15** Distribució direccional de les tempestes a la costa catalana durant el període 1988/2008. Els percentatges marquen la freqüència i els colors, la intensitat. Font: Mendoza et al., 2011.

### 3.5.3 Característiques de les tempestes

Per tal de descriure diferents events tempestuosos en estudis de planificació i organització d'infraestructura costanera s'analitzen bases de dades d'ones per obtenir informació sobre els esdeveniments més energètics en termes de probabilitat. Aquesta es quantifica en períodes de retorn sobre les més altes Hs.

Mitjançant un anàlisi d'ones de tempestes realitzat a Bolaños et al. (2008) amb les dades recopilades amb la XIOM, altures significants de les quatre boies localitzades a la taula 1, es poden obtenir les Hs d'ones de tempesta en termes de període de retorn.



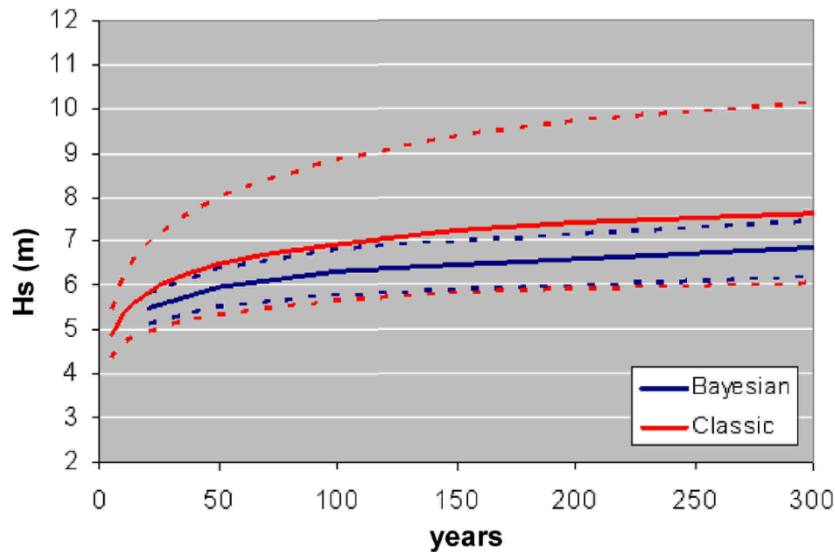
Boies XIOM		Període de Retorn (anys)					
		5	10	25	50	100	500
Cap de Tortosa		4,6	5,1	5,7	6,1	6,6	7,6
Llobregat	Hs	4,0	4,3	4,8	5,1	5,4	6,1
Tordera	(m)	4,5	5,0	5,5	5,9	6,3	7,2
Roses		5,3	6,0	6,9	7,5	8,1	9,5

**Taula 3.1** Resultats de l'anàlisi d'ones de tempesta realitzat a Bolaños et al., (2008). Dades obingudes a partir de la XIOM.

Les localitzacions de més al Nord i més al Sud (Tortosa i Roses) són les que compten amb ones més altes en la comparació d'events per al mateix període de retorn. Això es correspon perfectament a tots els anàlisis dels apartats anteriors ja que en el delta trobem el *fetch* més important i al cap de creus hi trobem la millor correlació amb els vents més forts. Tot i això, si comparem els dos sectors es podria pensar que les ones més grans afectarien el delta de l'Ebre, però aquesta diferència pot estar relacionada amb l'espectre bimodal estudiat en l'apartat anterior, que és especialment intens al Cap de Tortosa.

Per a identificar les tempestes es va aplicar el mètode POT i els resultats es van ajustar amb la distribució Weibull, la més òptima després d'estudiar alguns paràmetres com la semblança en els gràfics o el mètode dels mínims quadrats. S'ha de tenir en compte que qualsevol anàlisi d'aquest tipus es realitza sobre un nombre relativament petit d'elements, aquells que superen el llindar de  $H_s > 2$  m. La caracterització es torna més dèbil a mesura que s'incrementa el període de retorn ja que conta amb menys registres. Per exemple, al Cap de Tortosa es poden estimar resultats de  $H_s$  en un interval de 6-10 m per a events amb 300 anys de període de retorn (figura 15 línies vermelles). Tot això tenint en compte que en 18 anys d'anàlisi, la  $H_s$  més alta que s'ha registrat a la zona ha sigut de 5,95 m.

Per tal de poder disminuir aquest interval de confiança i aconseguir una precisió més alta en l'anàlisi d'extrems, aquest també es pot realitzar mitjançant la *Bayesian Generalized Pareto Estimation* (BGPE). Aquest mètode combina les distribucions de Weibull, Frechet i Gumbel en l'anomenada *Generalized Pareto Distribution* (GPD). Per a encaixar els resultats del mètode POT en una GPD s'han d'establir uns paràmetres amb l'objectiu de reduir la incertesa en l'estimació. En el cas anterior del delta de l'Ebre aquests paràmetres serien: (i) marcar un event improbable d'una altura de pic de 12 m que té una probabilitat de  $10^{-5}$ , (ii) un event característic com una  $H_s$  de 2,7 m amb una probabilitat de 0,4 i (ii) una tempesta assumible amb  $H_s$  de 6,5 m. Els resultats s'han comparat en la figura 3.16 i es pot apreciar com la BGPE (línies blaves) té més precisió en la caracterització d'extrems, sobretot els que tenen un període de retorn més alt.



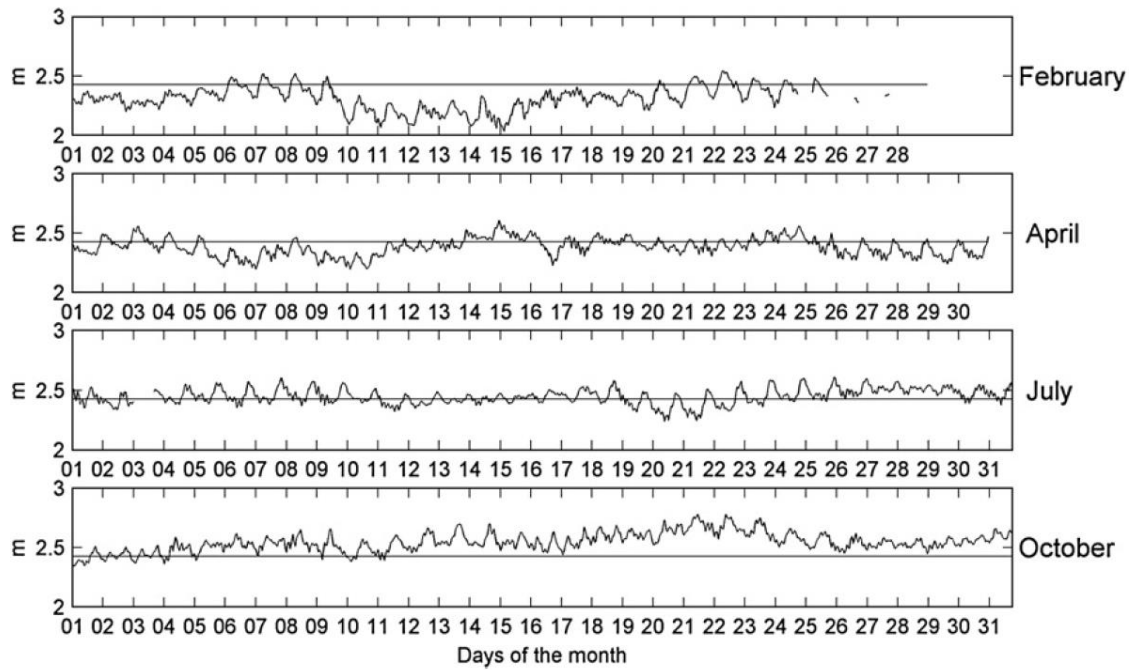
**Figura 3.16** Comparació del mètode clàssic amb una distribució de Wibull amb la BGPE d'events extrems al Cap de Tortosa. Font: Sánchez-Arcilla et al., 2008.

### 3.6 NIVELL MIG DEL MAR

La variació del nivell del mar en el Mediterrani no és tant important com altres mars i oceans. Tant és així que el rang d'oscil·lacions de marees varia entre 0,2 i 0,4 m, nivells relativament baixos. Tot i això, aquest rang pot augmentar fins a 1 m durant alguna tempesta.

És important però, tenir en compte aquestes fluctuacions atès que pot provocar inundacions localitzades en zones deltaïques, plans al·luvials i altres zones properes a la costa de baixa altitud, així com també pot portar problemes en parts de la desembocadura dels rius. Si la marea supera el nivell del riu, l'aigua salada es mescla amb el caudal i la salinitat es pot estendre força kilòmetres riu amunt.

Les causes de les oscil·lacions són: el rang astronòmic, que en el cas del Mediterrani són variacions de baixa freqüència; la temperatura de l'aigua, que provoca canvis en el nivell del mar en funció de l'estació de l'any; i la pressió atmosfèrica. És lògic pensar que a l'estiu el nivell del mar augmenta a causa de l'increment de temperatura, però a aquest efecte es suma la Alta Pressió de l'Atlàntic Nord que exerceix una influència considerable en el Mediterrani Occidental i fa que el nivell no sigui tan alt com en mesos de tardor. En alguns períodes de la resta de l'any actua la Alta Pressió del Centre d'Europa i això provoca una disminució del nivell que s'accentua en els mesos d'hivern (figura 3.17) (Bolaños et al., 2008).



**Figura 3.17** Fluctuacions del mig del mar de manera estacional del durant l'any 2005 a Sant Carles de la Ràpita. La línia recta marca el nivell mig. Font: Bolaños et al., 2008.

## 4. TEMPORAL DEL 28/09/15-01/10/15

---

Entre els tres últims dies de setembre i el primer dia d'octubre de l'any 2015 les costes catalanes i les de la resta d'Espanya van sofrir un intens onatge produït per un fort temporal que va venir acompanyat d'intenses pluges i altes velocitats de vent. Tal com hem pogut veure l'època de l'any més forta a nivell sinòptic comença al setembre, i és especialment intensa d'octubre a gener que és on es troba aquesta pertorbació. Aquest va ser el primer temporal de llevant de tardor que es va produir a l'any 2015 i va produir onades de fins a 6 metres en alguns punts de la costa catalana.



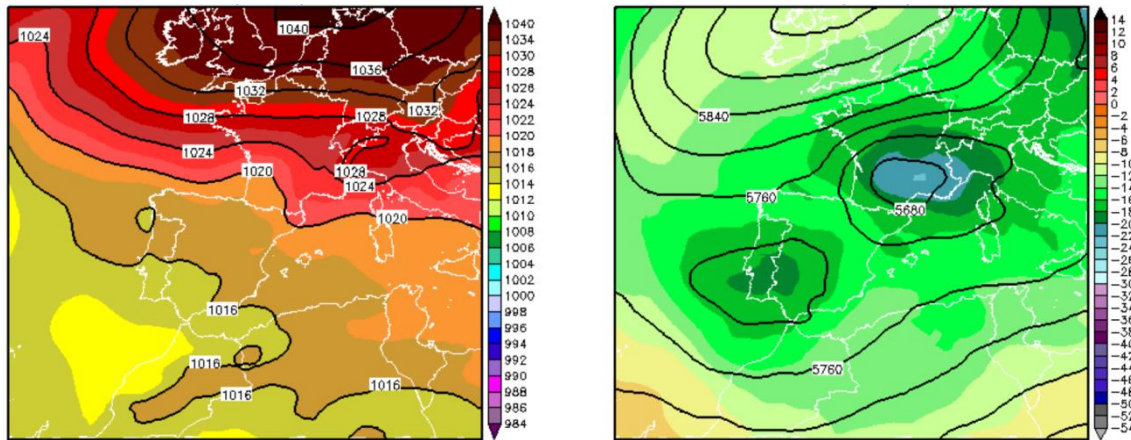
**Figura 4.1** Onatge a Sant Adrià de Besòs el 30/09/15. Font: Màrius Tomé Covelo.

### 4.1 SITUACIÓ METEOROLÒGICA

Tal com es pot veure en el Butlletí Climàtic Mensual, el setembre de 2015 es va caracteritzar per ser un mes bastant fred marcat pel desplaçament cap al nord d'un anticicló de l'Atlàntic molt potent de 1040 hPa (figura 4.2) que va propiciar l'entrada de depressions fredes a la península Ibèrica provinents d'altres latituds. Gràcies a aquesta configuració es va parar l'entrada d'aire calent provinent del Nord d'Àfrica tant característica durant els mesos d'estiu. A partir d'aquí va començar el pas de pertorbacions negatives associades a l'aire fred que va provocar tempestes localment fortes com la que ha sigut seleccionada. És interessant veure que aquest patró es correspon al mecanisme habitual de formació de temporals al Mediterrani Occidental (veure apartat 3.5.1).

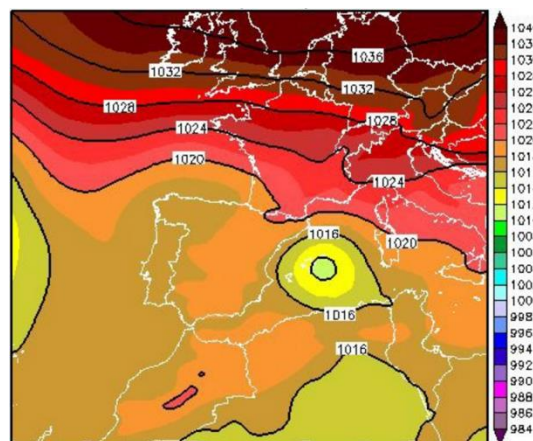
Precisament, entre els dies 26 i 28 de setembre una entrada de baixes pressions provinent de l'Est d'Europa va creuar Catalunya i la Península Ibèrica. La figura 4.2 representa un mapa isobàric i un mapa de temperatures a la troposfera que es va prendre el dia 29 d'agost a les 12:00 h UTC. En la imatge de l'esquerra es pot veure com la influència d'aquest anticicló situat a Gran Bretanya i a la península

d'Escandinàvia, restringia el flux a Catalunya en la direcció de llevant. La imatge de la dreta és un mapa de temperatures a un nivell de 500 hPa, on es troba la troposfera. Aquí es pot apreciar el cúmul d'aire fred que es va concentrar al Nord de Catalunya amb una temperatura de -22 °C en aquesta altura.



**Figura 4.3** Mapa de pressió en superfície i de temperatures a la troposfera a Europa Occidental i el Nord d'Àfrica el dia 29/09/15 12:00 h. Escales en hPa i °C. Font: Butlletí Climàtic Mensual SMC.

La configuració de les pressions en la superfície es va veure alterada el dia 30 quan es va produir la irrupció d'una borrasca que es va assentar en les illes balears tal com mostra la figura 4.4. Les zones fredes que es van formar aquest dia i el dia anterior es van mesclar amb el flux humit i relativament càlid procedent del Mediterrani. Això va provocar les precipitacions més fortes d'aquest mes que es van donar per la costa i els Prepirineu. Del litoral es destaquen els punts de l'extrem Nord de la Costa Brava i Tarragona on les precipitacions van superar els 100 mm.



**Figura 4.4** Mapa de pressió en superfície a Europa Occidental i el Nord d'Àfrica el dia 30/09/15. Escala en hPa. Font: Butlletí Climàtic Mensual SMC.

Durant aquests dies les estacions meteorològiques van captar ratxes de vent d'entre 50 i 70 km/h, que es van intensificar sobre tot a la meitat Nord de Catalunya. Aquest va ser el principal causant dels forts onatges i en la taula 1 podem veure quines van ser les zones més afectades, on es van registrar les altures més altes d'ona, que comprenen la part central i la Costa Brava.

Estació	Comarca	Velocitat màxima de vent (km/h)
Puig Sesolles (1.668 m)	Vallès Oriental	113.0
Barcelona - Observatori Fabra	Barcelonès	74.5
Port de Barcelona - Bocana Sud	Baix Llobregat	73.4
Sant Pere Pescador	Alt Empordà	72.0
Montserrat - Sant Dimes	Bages	65.2
Montsec d'Ares (1.572 m)	Pallars Jussà	63.7

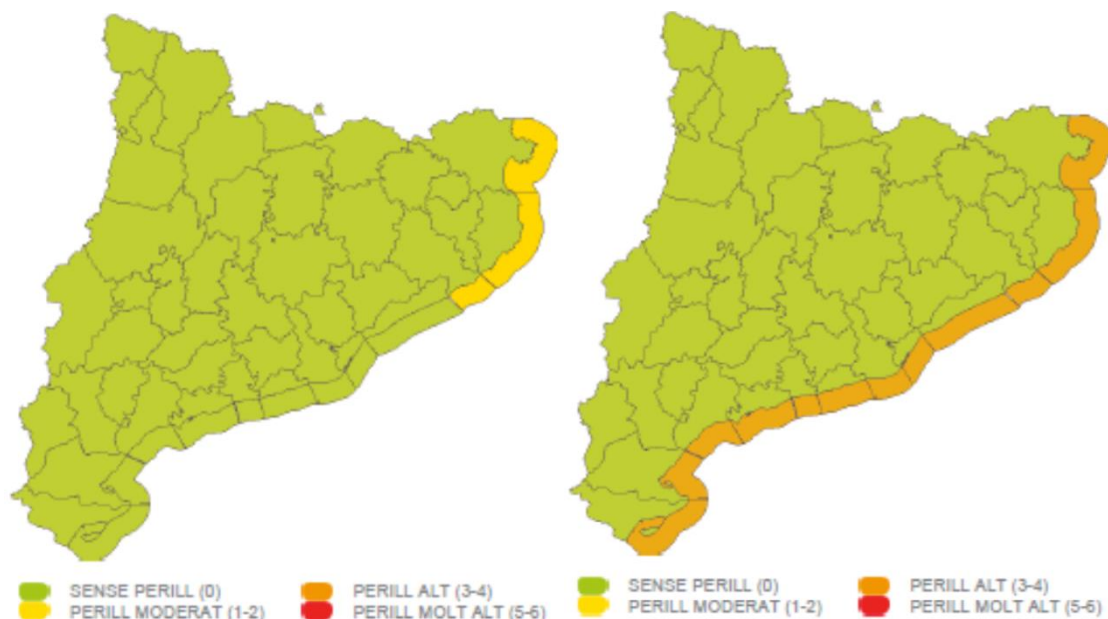
**Taula 4.1** Registres més alts de vent en entre el 29 i 30 de setembre. Font: SMC

## 4.2 ALERTA D'EMERGÈNCIA

El 29 de setembre de l'any 2015 el SMC va emetre un comunicat alertant els grups actuant d'emergència en aquest territori. Les previsions meteorològiques de grans acumulacions de pluja i l'estat del mar van propiciar l'execució de la prealerta del Pla d'emergències per inundacions a Catalunya (INUNCAT).

Les previsions en inundacions que podien arribar a ser majors de 100 mm en 24h, amb concentracions de 20 l/m<sup>2</sup> en 30 min, van ser qualificades com a fenòmens de tipus local, és a dir, que de tots els territoris que van se posats en alerta aquesta situació es pot donar en un 30% de la distribució geogràfica prevista.

En canvi, pel que fa a l'estat del mar, la distribució geogràfica va rebre la qualificació de tipus extens, amb un 70% d'afectació. Durant la tarda del 29 de setembre es va posar sobre avís les costes de l'Empordà i durant el dia següent les previsions van indicar que el mar guanyaria intensitat per tot el litoral arribant fàcilment a altures d'ona de 2,5 m.



**Figura 4.5** Zones costaneres alertades el dia 29/09/15 (esquerra) i el dia 30/09/15 (dreta). Font: CECAT



En la figura 4.5 es pot veure les situacions de prealerta a la costa Catalana i el nivell que se li va atorgar. La totalitat de la costa catalana va arribar a perill alt (3-4 m) el dia 30. Les imatges es poden trobar a la pàgina web del Centre de Coordinació operativa de Catalunya (CECAT) del Departament d'Interior de la Generalitat.

Aquests mapes es relacionen amb l'objectiu del treball en el sentit que si es pogués crear un algoritme de seguiment aplicable a diversos temporals es podria delimitar amb més exactitud la zona costanera previsiblement més afectada. D'aquesta manera el nombre de d'agents d'emergència que haurien de ser posats en alerta es reduiria considerablement.

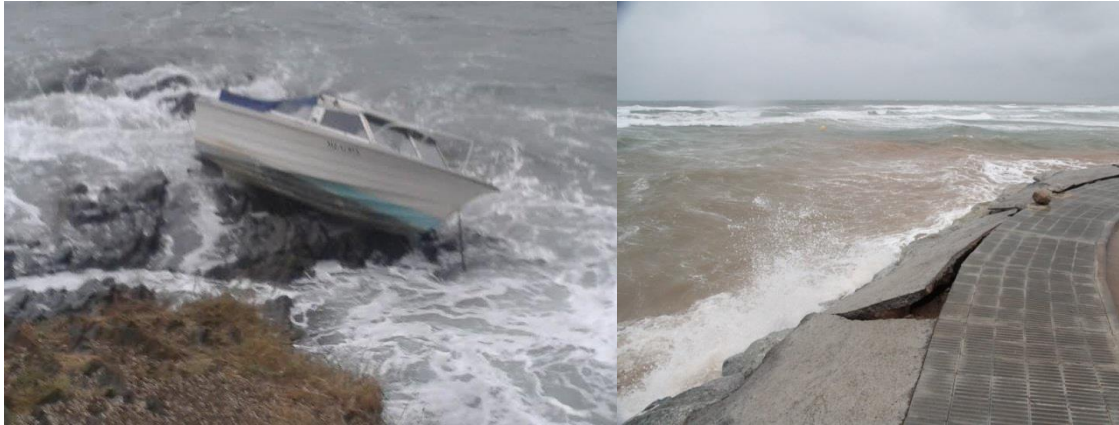
### 4.3 CONSEQÜÈNCIES DEL DESASTRE

En els dies que es va produir aquest temporal, els serveis d'emergència de Catalunya van haver d'atendre quasi mig centenar d'emergències i centenars de trucades de persones afectades per les inundacions produïdes per les pluges. Quan diverses carreteres van quedar inundades, com la que es va produir amb el desbordament d'una riera a la Canonja al pla de Tarragona que va tallar la N-340, és va executar de manera definitiva el pla INUNCAT.

Totes les previsions del dia 29 apuntaven a que el temporal s'intensificaria al llarg de les hores i així va ser com el dia 30 es van produir els màxims en els registres de vents i per tant en la intensitat de l'onatge. Tal com s'ha mencionat, en alguns punts del sistema central les velocitats del vent van superar els 100 km/h. Velocitats tan altes poden arribar a destruir les part més susceptibles del mobiliari urbà com bancs, papereres i senyalitzacions, a part de que es poden arrencar arbres de soca-rel. La circulació viària també queda molt perjudicada i augmenta el risc d'accidents a causa de que la força del vent dificulta la maniobrabilitat dels vehicles.

Les acumulacions de pluja a les comarques de Girona van ser les que van produir més trucades. Inundacions a plantes baixes, locals i carrers va fer impossible la circulació o fins i tot sortir de casa en poblacions com Sant Pere Pescador, Roses o Castelló d'Empúries. Els serveis de transport de viatges per ferrocarril Ferrocarril de l'Ebre va ser tallat per acumulació de fang i pedres que van interrompre la circulació entre les estacions de Reus i les Borges Blanques. Pel mateix motiu un altre tren de mitja distància de Barcelona-Saragossa va quedar bloquejat a mig trajecte.

Pel que fa a l'onatge, el dia 30 els vents van girar a Gregal (direcció Nord-Est) amb molta intensitat a la costa i va comportar un empitjorament notable de la mar. En el tram de costa que va des de Portbou fins a l'Escala es van arribar a mesurar ones de fins a 5 i 6 metres. Tot i això, les pluges van disminuir perquè van ser desplaçades en direcció a Itàlia, però el temporal marítim va produir danys materials en diversos punts de la Costa Brava. A Cadaqués, algunes barques amarrades van patir les conseqüències de la mala mar i van ser estavellades contra les roques. A Griells de l'Estartit les onades van descalçar la vorera formigonada de la corba on acabava el carrer Tulipa, al límit de la zona urbanitzada. Un passeig marítim que no conta amb solucions definitives de protecció, sobretot a causa de que l'aigua ha guanyat terreny a la platja en els últims anys.



**Figura 4.6** Imatges del temporal a la Costa Brava. Cadaqués (esquerra) Foto: Àngel Suárez. Griells de l'Estartit (dreta) Foto: El Punt Avui.

El desastre més gran però es va produir a Lloret on els forts onatges es va cobrar la vida de 2 persones. Tal com es va ordenar en l'alerta es van prohibir les entrades a ports i espigons, però les tempestes són uns dels esdeveniments més imprevisibles.



**Figura 4.7** Bandera vermella a la platja de Lloret. Foto: Joan Sabater.



## 5. METODOLOGIA

---

L'objectiu que s'ha marcat per a aquest treball és l'obtenció d'un algoritme que permeti rastrejar i realitzar un seguiment d'altures d'ona en el Mediterrani. En primer lloc es partirà d'un tractament de dades i un estudi gràfic de les altures d'ona més altes produïdes per la tempesta del 28/09/15 al 01/10/15 al Nord-Oest del Mediterrani. Seguidament s'intentarà profunditzar en algun moment o zona particular per aplicar un algoritme de rastreig en un tram d'aquest temporal. L'èxit d'aquest exercici permetrà saber si realment al Mediterrani les ones de tempesta poden arribar a trajectòries i si aquestes són computables.

Per estudiar el temporal s'identificaran les altures d'ona més altes en cada secció de temps, trobar la seva localització i dibuixar la trajectòria que formen en funció del temps per identificar si la modelització s'ajusta amb la informació de la realitat. D'entrada amb aquesta elecció s'assumeixen uns riscos, com per exemple que els màxims es trobin molt dispersos i no es pugui establir un recorregut clar o que es produeixi més d'un pic espacial en les altures d'ona. En aquest segon cas hi hauria una pèrdua important d'informació per no poder analitzar tots els pics perquè només s'està seguint el més gran.

Després de reproduir el temporal, l'algoritme que es vol posar a prova és el d'identificar altures d'ona importants contingudes en les proximitats d'algun dels màxims anteriors que es vulgui destacar i veure si aquestes formen una trajectòria adequada amb el seguiment general del temporal.

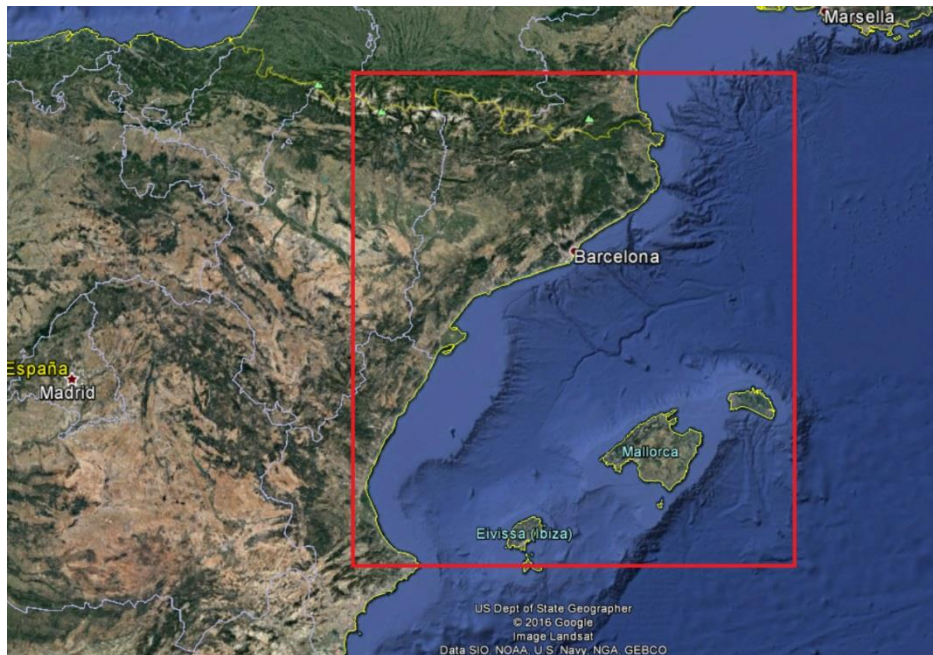
Per fer un estudi d'aquestes característiques es necessita treballar sobre una malla computacional a la superfície del Mediterrani d'una determinada resolució que aportï dades de manera seqüencial de tal manera que es pugui generar una evolució de les variables en funció del temps. Aquests resultats han vingut donats pel model SWAN que, com s'ha demostrat en la secció 2.3, ofereix una descripció més precisa de les situacions extremes i és idoni en la realització d'estudis i recerques. A més a més, com que es realitza el tractament d'un temporal a petita escala i a un nivell del litoral, aquest model és la solució més òptima en aquesta transició d'estat estacionari a costaner.

Un cop s'han obtingut totes les variables sol·licitades del model, aquestes han sigut indexades en matrius generades en format matlab. El programa matlab s'utilitzarà per al desenvolupament de tot l'apartat computacional que requereix aquest treball partint del tractament d'aquestes matrius amb l'exploració de resultats fins arribar a trobar el mecanisme més adequat en el seguiment d'ones.

Donat que el format de l'algoritme s'obtindrà en aquest format de software, s'indiquen tots els passos que s'han seguit per a la construcció d'aquest arxiu i els gràfics corresponents, que ofereixen el suport visual idoni per a realitzar una discussió de resultats convenient.

## 5.1 MODELITZACIÓ SWAN

La malla on s'han pres les dades ocupa l'espai rectangular definit a la figura 5.1, que inclou la costa catalana, part de la costa valenciana i les Illes Balears. El rectangle està comprès entre el vèrtex superior esquerra, que es troba als Pirineus francesos al Nord d'Aragó, de coordenades Lat.: 42°49'48" N Long.: 28'12"O i el vèrtex inferior dret, localitzat al Sud-Est de les Illes Balears, de coordenades Lat.: 38°40'12" N Long.: 4°30' E.



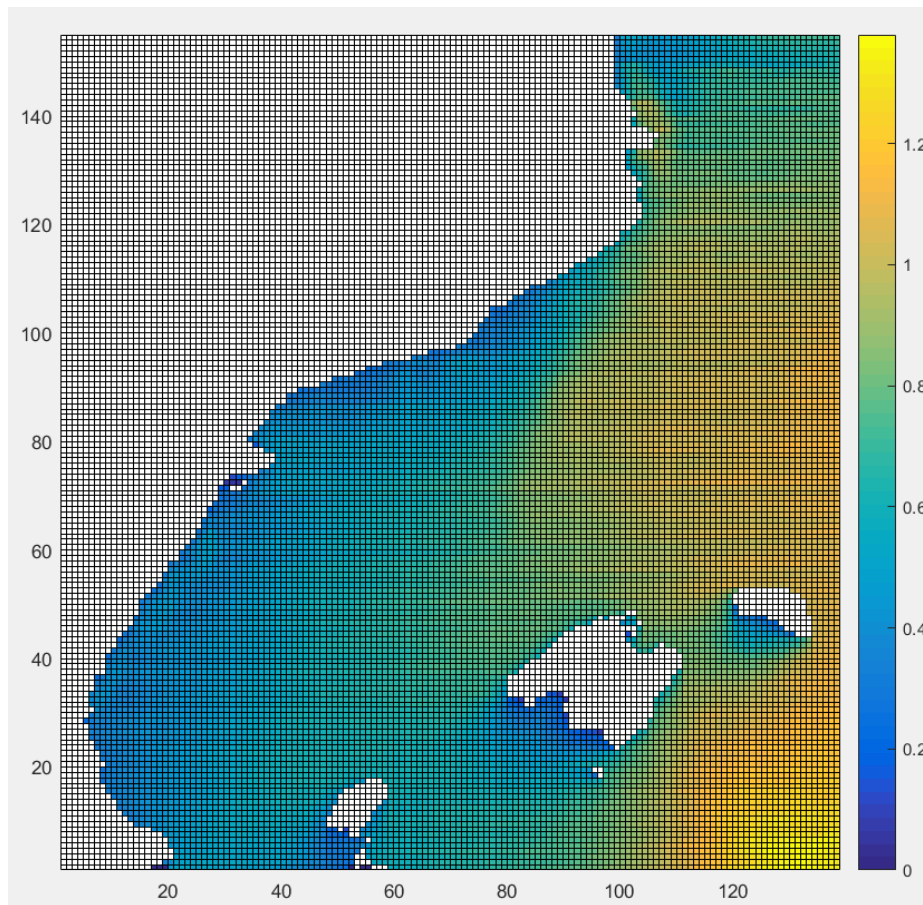
**Figura 5.1** Localització de l'àrea d'estudi on s'ha generat la malla del model SWAN. Font: Google Earth.

Solament durant els quatre dies que ocupen el temporal es s'han generat més de 160 Mb de dades en format .mat de manera matricial. Els resultats es troben mallats en matrius on les files i les columnes representen la distribució espacial dels valors, de tal manera que la posició és anàloga a l'espai real en que es treballa.

Aquesta àrea d'aproximadament 770 x 690 km ha estat dividida en seccions de 5 x 5 km que conformen la resolució espacial escollida, de tal manera que cada matriu compta amb 155x139 elements. Les úniques matrius que s'utilitzaran en aquest exercici seran les que determinen la altura significant d'ona i les del període. A part de les altures en cada punt, els resultats del SWAN també inclouen direccions d'ona en cada moment. També s'inclouen dades fixes marcades per la localització com són la batimetria i les coordenades de cada element de la malla que també s'han detallat amb la mateixa resolució.

Els resultats del model SWAN s'han obtingut a partir d'un reanàlisi de dades meteorològiques de vent que s'ha generat a una resolució de 9 x 9 km. Aquest ha sigut convenientment ajustat per a aquest anàlisi. Cada matriu de variables s'ha generat amb un interval de temps de 20 min. De tal manera que entre el 28/09/2015 a les 00:20 h que es va reproduir la primera matriu, i el 01/10/2015 a les 00:00 que es va reproduir l'última s'han obtingut un total de 288 matrius.

La figura 5.2 mostra el gràfic de la primera matriu i es pot veure com es representa aquest mapa amb determinats valors d'alçada d'ona.



**Figura 5.2** Resultat del plot de la primera matriu de Hs el dia 28/09/15 00:02. Resolució de píxel 5 x 5 km. Escala amb metres.

Aquesta imatge i totes les de l'estil s'han obtingut amb una senzilla funció `pcolor(A)`. D'aquesta manera es pot apreciar el mallat de píxels que es corresponen a cada valor de la matriu.

## 5.2 TRACTAMENT DE DADES

Per poder treballar amb la gran quantitat de matrius que s'han disposat, primer s'han d'organitzar els arxius que es troben separats per dies. C088, C089, C0810 i C0811 són els noms dels blocs contenidors de totes les matrius per als dies 28, 29 i 30 de setembre i 1 d'octubre respectivament. Dintre d'aquests blocs els resultats SWAN es classifiquen en matrius *Hsig* (altura significant d'ona), *Hswell* (altura d'ones *swell*), *Tm01* (període mig de les ones), etc. Però de totes aquestes dades només s'utilitzaran les matrius *Hsig* i *Tm01*.

Per agrupar tota la informació d'altures d'ona en un únic arxiu s'ha utilitzat el comandament `struct` que serveix per a tractar els elements en forma esquemàtica agafant conjunts i subconjunts. Es pot veure que les matrius Hs s'han obtingut mitjançant el seu nom amb el signe “\*” per agafar tots els elements *Hsig*:

```
Hsig = struct;  
Hsig.a = load('SWAN data/C088.mat', 'Hsig*');  
Hsig.b = load('SWAN data/C089.mat', 'Hsig*');  
Hsig.c = load('SWAN data/C0810.mat', 'Hsig*');  
Hsig.d = load('SWAN data/C0811.mat', 'Hsig*');
```

**Codi .mat 5.1** Carga dels arxius a l'estructura Hsig

A partir d'aquí es crea un vector amb els índex de cada conjunt dia=[a,b,c,d] i es fa un recompte d'elements i de matrius que hi ha cada dia fent servir la funció *numel*. Es podria introduir el número directament el nombre d'elements amb que es treballa, però d'aquesta manera s'aconsegueix un script per si es vol treballar amb diferents dades. Depenent del nombre d'anàlisis la quantitat de matrius canvia i depenent de com sigui la malla, les matrius poden tenir més o menys valors:

```
dia = fieldnames(Hsig);  
Ndies = numel(dia);  
Nmatrius = numel(fieldnames(Hsig.a));
```

**Codi .mat 5.2** Comptatge d'elements.

Aquests recomptes seran necessaris per a introduir *loops* que apliquen funcions a la *Hsig*. També s'utilitzaran per a la producció de vectors i matrius contenidors de molts elements. En aquest cas particular es podria treballar amb Ndies=4 i Nmatrius=72.

### 5.3 IDENTIFICACIÓ DE LA TEMPESTA

S'ha estudiat el desenvolupament del temporal en els tres sectors de la costa que s'han utilitzat per descriure l'àrea d'estudi: el Delta de l'Ebre, Barcelona i la Costa Brava. Per aquest motiu s'han buscat tres punts de la malla SWAN pròxims als que s'han fet servir en el model SIMAR i s'han construït tres vectors en funció del temps que indiquen les altures significants durant els 4 dies. Aquest anàlisi fragmentat permetrà descriure les diferències en la presa de dades d'un mateix fenomen des de punts diferents i, a més a més, trobar el temps a partir del qual les altures d'ona van superar el llindar que marca el registre d'una tempesta ( $H_s > 2$  m).

Si es vol obtenir valor d'un element d'una matriu segons la seva posició s'escriu directament  $A(a,b)$  on a,b són les seves coordenades. Donat que tenim un conjunt de matrius és necessari introduir aquestes dades mitjançant un *loop* amb la funció *structfun* que permet aplicar funcions a cada camp d'una estructura escalar com les matrius contingudes en cada dia:

```
for i = 1:Ndies  
    [Hs.(dia{i})] = structfun(@(M) M(a,b), Hsig.(dia{i}));  
end
```

**Codi .mat 5.3** Aplicació de valors en cada matriu segons els punts buscats (a,b).

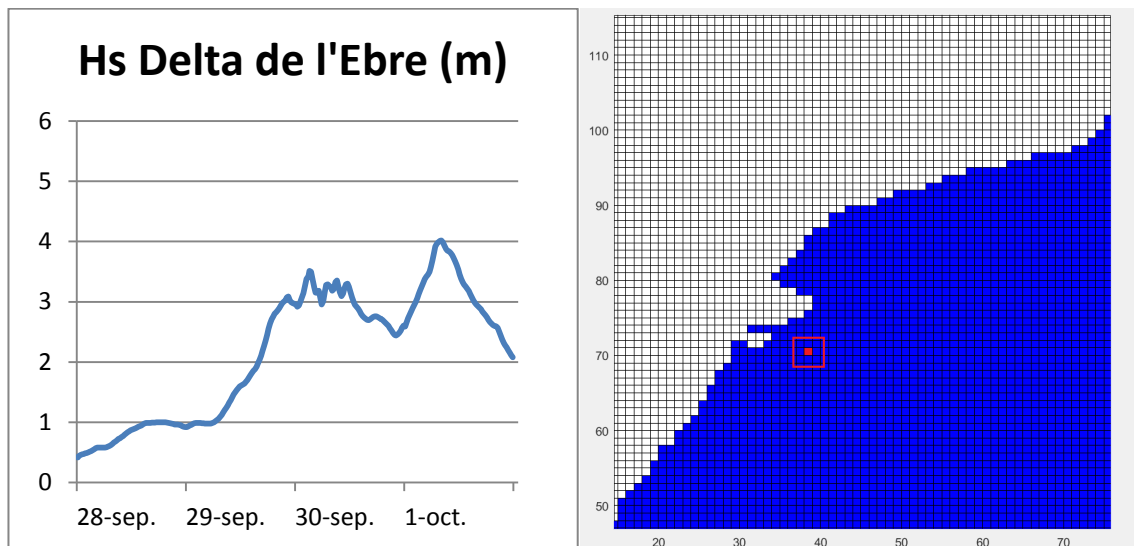
Seguidament es fa un altre *loop* per omplir un vector de resultats que compta amb 288 valors (Ndies\*Nmatrius) ordenats en el temps:

```
k = 1;
V = zeros(Ndies*Nmatrius,1);

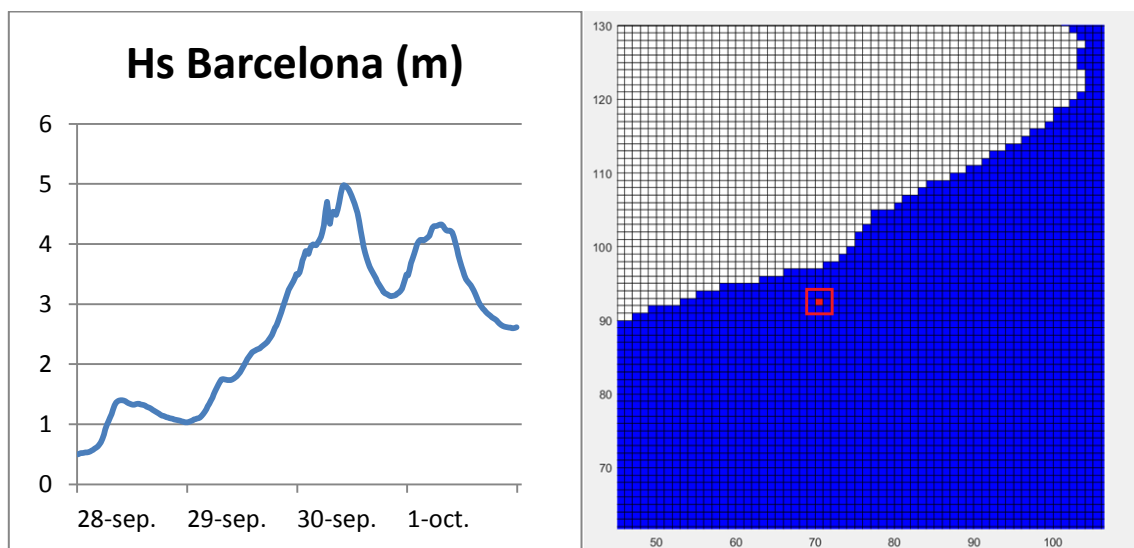
for i = 1:Ndies
    dies = fieldnames(Hsig.(dia{i}));
    for j = 1:Nmatrius
        V(k,1) = Hs.(dia{i})(j);
        k = k + 1;
    end
end
```

**Codi .mat 5.4** *Obtenció de tots els valors en el vector V.*

Per a realitzar els plots d'aquests vectors en funció dels dies s'ha fet servir el programa excel. En les següents imatges es presenten els resultats d'aquestes evolucions juntament amb les localitzacions (obtingudes amb imatges matricials) dels punts que s'han escollit relatius a les seves ones.

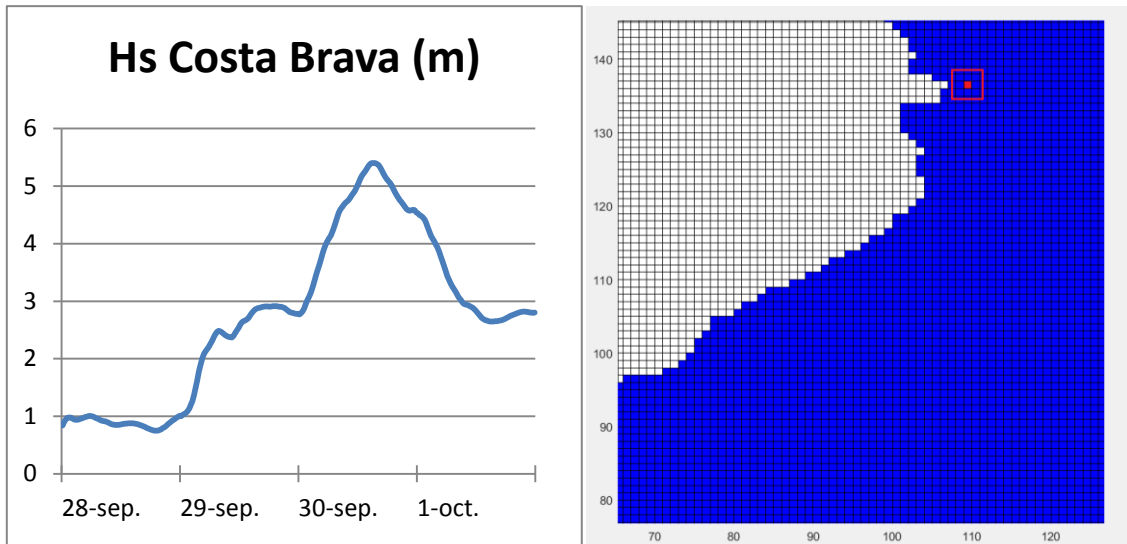


**Figura 5.3** Gràfic  $Hs(m)-T(dies)$  d'un punt situat al Sud-Est del Delta de l'Ebre. Coordenades [69,38]



**Figura 5.4** Gràfic  $Hs(m)-T(dies)$  d'un punt situat al Sud de Barcelona. Coordenades [92,71]





**Figura 5.5** Gràfic  $H_s(m)$ - $T(dies)$  d'un punt situat a l'Est del Cap de Creus. Coordenades [137,109]

Utilitzant les premisses que s'han exposat a la discussió de tempestes (veure apartat 3.5) es pot afirmar que la tempesta no va ser registrada com a tal fins passades algunes hores del dia 29 quan en tots els punts les altures significants van superar els 2 m. El primer dia els valors les  $H_s$  es van situar a una altura aproximada de 1 m, que es pot considerar un estat del mar normal, i a partir d'aquí les altures van anar en augment en tots els sectors. El dia 3 es van produir les altures més altes d'ona que es van registrar i durant el dia 1 d'octubre el mar va anar perdent força al llarg de tota la costa.

S'ha de destacar que les altures més altes d'ona es van detectar cap al Nord de Catalunya. Especialment altes van ser les que es van registrar al Cap de Creus tal com es veu a la figura 5.5 on van arribar a superar els 5 m. Al Sud de Catalunya es va registrar algun onatge aïllat d'uns 4 m però s'entén que aquesta part de la costa no va ser la més afectada pel temporal, al menys en termes d'altura.

Estudiant solament aquests tres punts de la malla no es pot fer un seguiment massa precís, però sí que es pot destacar un moviment genèric del front d'ona. D'aquí es dedueix que cap al final del segon dia el front es desplaçava des del Sud-Est de la costa amb registres notables de més de 3 m al Delta de l'Ebre i unes hores més tard es desplaçava cap al Nord amb observacions similars a Barcelona. Seguidament, cap a la meitat del dia 30, l'altura de l'aigua al sistema central comença a caure i és produeix el màxim més alt al Nord, indicant que el front d'ona es trobava en aquell sector i a més, molt pròxim a la costa. Per últim, es produeix un segon pic de més de 4 m a Barcelona durant el dia 1 d'octubre quan molt probablement la tempesta va retrocedir una altra vegada cap al Sud, però aquest dia ja s'estaven estabilitzant les altures al llarg de la costa i és possible que el temporal fóra desapareixent o es desplaçava cap a l'Est.



## 5.4 RECORREGUT DE MÀXIMS

La funció per obtenir els màxims de cada matriu és relativament senzilla, aquesta genera un vector dels màxims de cada columna i a seguidament busca el valor més alt d'aquest vector. Per a la primera matriu de nom *Hsig\_20150928\_002000* resulta en la següent formulació:

```
>> [m, i] = max(Hsig_20150928_002000(:))  
m = 1.3797  
i = 19841
```

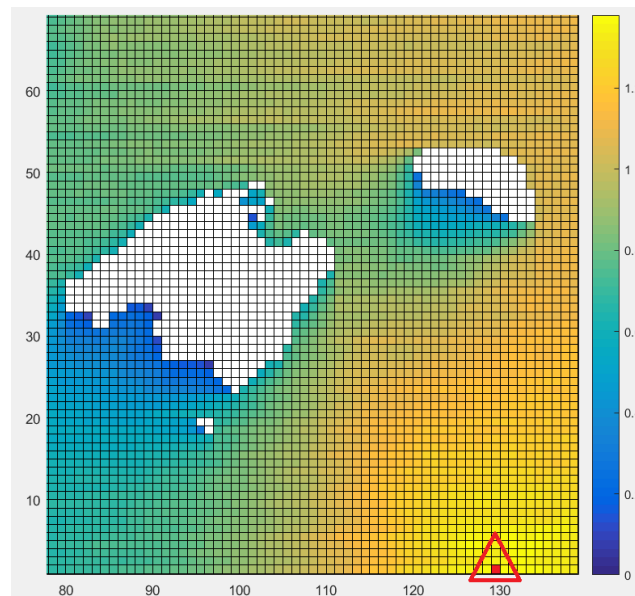
**Codi .mat 5.5** *Funció de màxim en una matriu donada. Hs max: 1,38 m, el dia 28/09/15 a les 00:20.*

El segon valor que dóna la funció com a output, anomenat *i*, indica on es troba aquest valor dintre la matriu seguint un ordre lineal, és a dir si en comptes de tenir files i columnes els valors estessin ordenats en un vector, aquest ocuparia la posició 19841. Per obtenir la posició amb els dos subíndexs es pot utilitzar la funció *ind2sub* que utilitza com a inputs la mida de la matriu i el resultat *i*:

```
>> [row, col] = ind2sub(size(Hsig_20150928_002000), i)  
row = 1  
col = 129
```

**Codi .mat 5.6** *Càlcul dels subíndexs d'un valor dintre una matriu amb la seva localització.*

Ara que s'ha identificat el primer màxim (1,38 m) i apareix la seva localització es pot trobar aquest valor en el mapa:



**Figura 5.6** *Localització del primer màxim per coordenades. Sud-Est de les Illes Balears 28/10/15 00:20. Coordenades [1,129]. Escala amb metres.*

Si s'utilitza la mateixa funció per a trobar tots els màxims de totes les matrius que hi ha, es pot generar un vector amb aquests 288 màxims i comparar-los per trobar el valor d'ona més alt que es va registrar en aquests quatre dies.

Per a tal efecte s'ha creat la funció *maxLoc* que combina les funcions anteriors:

```
function [m, row, col] = maxLoc(A)
[m, i] = max(A(:));
[row, col] = ind2sub(size(A), i);
end
```

**Codi .mat 5.7** *Funció maxLoc, amb els seus outputs corresponents.*

D'aquesta manera quan s'introdueixi qualsevol matriu a la funció s'obtidran directament el màxim i la seva posició de fila i columna.

#### 5.4.1 Matriu de màxims

Per a buscar el màxim de cada matriu, senzillament s'aplica un *loop*, fent servir l'entrada *for*, que aplica la funció *maxLoc* per a tots els elements dels 4 dies amb la mateixa eina *structfun* que s'ha utilitzat abans per estudiar l'evolució:

```
for i = 1:Ndies
    [max.(dia{i}), mRow.(dia{i}), mCol.(dia{i})] = structfun(@(M)
maxLoc(M), Hsig.(dia{i}));
end
```

**Codi .mat 5.8** *Loop de recerca de màxims*

Aquest *loop* genera tres outputs en forma de màxim en cada secció de temps i posició de fila i columna d'aquest punt en totes les matrius de cada dia. Per tal d'obtenir el màxim absolut del temporal s'ha de condensar tots els valors en una única matriu de mida 288 x 3 per a poder operar amb tots aquest valors. Partint de la matriu de zeros d'aquesta mida per a  $k=1$  es comença amb un *loop* per a les Hsig dels quatre dies i després realitza un *loop* per a les 72 matrius de cada dia:

```
k = 1; Ndies
MaxMatrix = zeros(Ndies*Nmatrius, 3);

for i = 1: Ndies
    dies = fieldnames(Hsig.(dia{i}));
    for j = 1: Nmatrius
        MaxMatrix(k,1) = mRow.(dia{i})(j);
        MaxMatrix(k,2) = mCol.(dia{i})(j);
        MaxMatrix(k,3) = Max.(dia{i})(j);
        k = k + 1;
    end
end
```

**Codi .mat 5.9** *Doble loop d'obtenció de la matriu de màxims.*

La matriu que s'ha obtingut, anomenada *MaxMatrix* té tres columnes: a la primera es troben les posicions de fila dels màxims; a la segona, les posicions de columna; i a la tercera, els valors dels màxims. Totes les  $Hs < 2m$  seran descartades perquè no compleixen la condició de tempesta, per tant, no s'han tingut en compte els 72 primers valors (cap màxim del primer dia va superar els 2 m) i totes les representacions començaran a partir d'aquesta posició.

S'ha de destacar també que hi ha un gran nombre de màxims en aquesta matriu que es troben a l'última columna 139. Si es fa un simple comptatge d'aquests valors es pot veure que una tercera part de tots els valors es troben en aquesta franja:

```
sum(MaxMatrix(:,2) == 139)=96
```

La majoria d'aquests registres es situen cap al segon dia. Això significa que durant aquest temps la zona d'altures més altes d'ona es trobava desplaçada cap a l'Est fora de la zona d'estudi cosa que impedeix obtenir el màxim real durant aquestes hores. Tot i que durant aquest interval no es van obtenir les altures més altes possibles (la majoria de valors es troben per sota dels 3,5 m) és una informació a tenir en compte a l'hora de realitzar el seguiment dels pics, ja que els fronts d'ona principals segurament s'hauran desplaçat més cap a l'Est.

A la figura 6.7 es mostra el gràfic de l'estat del mar el dia 29 a les 00:20 quan es detecta un dels màxims en la columna 139. Es pot veure com les ones d'altura més alta s'acumulen cap a la franja Est i s'intueix que aquesta pot ser molt més gran:

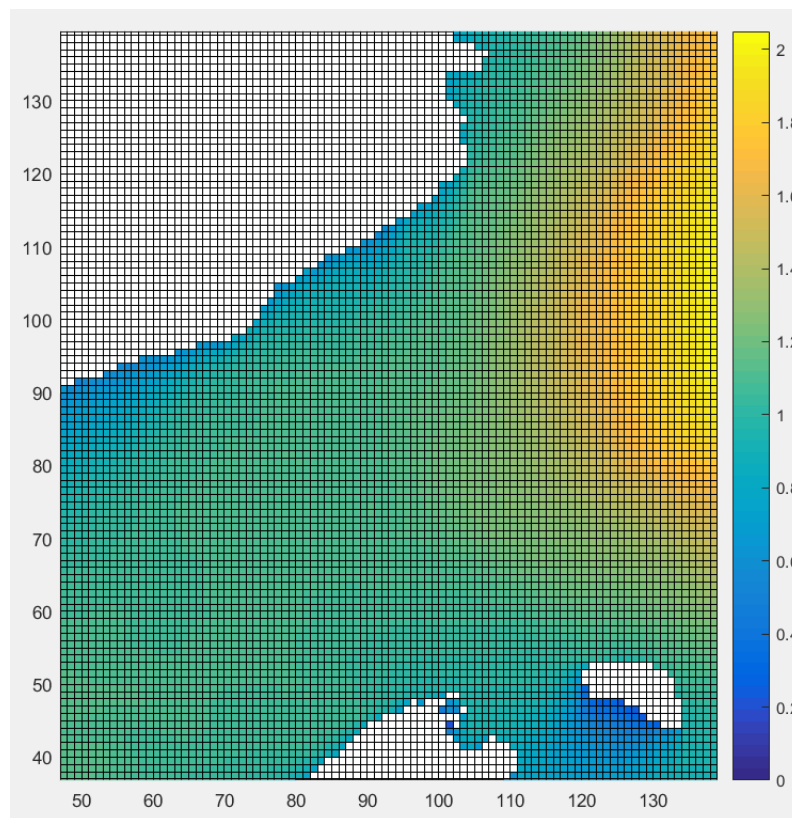


Figura 5.7 Plot de Hs el dia 29/09/15 a les 00:20.

#### 5.4.2 Màxim absolut

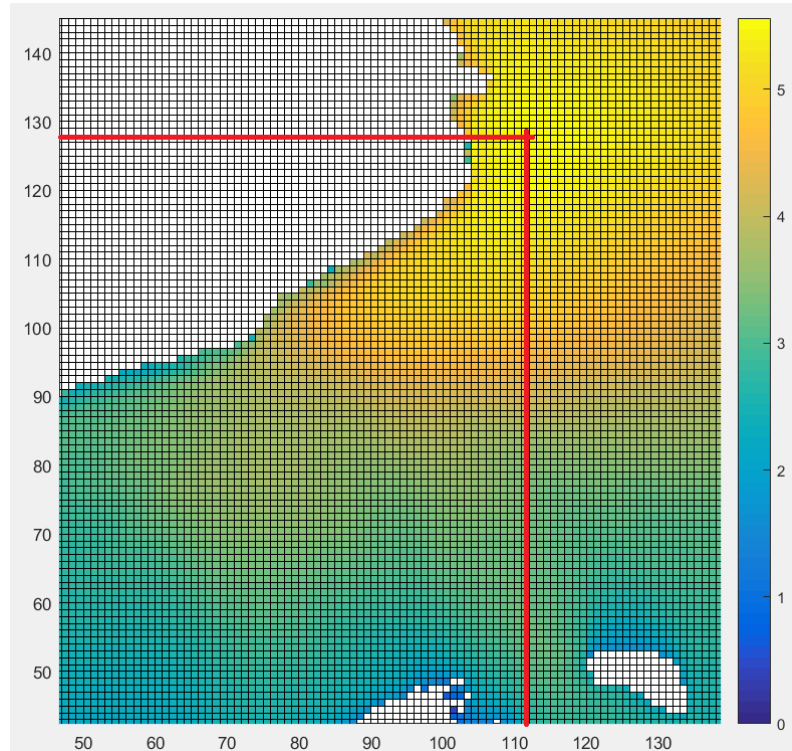
Ara que ja s'ha obtingut la *MaxMatrix* aplicant una funció de *max* sobre la tercera fila es pot obtenir el màxim absolut i després buscar les coordenades associades a aquest valor:

```
MaxValue=max(MaxMatrix(:,3));  
[order,c]=find(MaxMatrix==max(MaxMatrix(:,3)));  
MRow=MaxMatrix(order,1);  
MCol=MaxMatrix(order,2);
```

**Codi .mat 5.10** Obtenció de l'altura màxima i les seves coordenades.

El valor de *MaxValue* ha resultat en 5,56 m (altura d'ona significant més alta), i la posició espacial d'aquest valor, que ve donada pels valors *MRow* i *MCol*, és [127,113] en aquest espai matricial.

Per trobar quin va ser el moment en que es va prendre la mesura s'ha de tenir en compte el valor de *order* que marca la col·locació de les matrius cronològicament. En aquest cas aquesta mesura va ser la número 190 i això equival al dia 30 a les 15:20. En aquest moment es va registrar l'altura d'ona més alta durant tot el temporal i en la figura 6.8 apareix la seva posició:



**Figura 5.8** Localització de l'altura més alta d'ona per coordenades [127,113]. 30/09/15 15:20. Escala amb metres.

Es pot veure que, a diferència del primer dia, els onatges més forts s'han desplaçat del Sud-Est de les Illes Balears fins a les proximitats de la Costa Brava. En aquest punt però, hi trobem altures d'ona molt més altes que les mencionades en la primera mostra. Un signe clar de la progressió i creixement de la tempesta que en aquest punt i aquell moment es trobava en el seu zenit.

### 5.4.3 Mapa de màxims

Per a representar correctament els màxims de cada matriu i poder identificar bé les posicions tots aquests punts, és millor partir d'un mapa bàsic sense cap altura d'ona on només s'ubiquen els punts més alts de manera espacial.

En primer lloc s'agafa qualsevol de les matrius que tenim (totes tenen les mateixes superfícies de terra i mar amb els mateixos contorns) i es simplifica amb dos valors. Un valor 0 per a l'espai de terra i un valor de 1 per al mar identificant els elements amb *isnan* (Nan es el nom dels elements de terra):

```
load('C088.mat');  
BaseM=Hsig.a.Hsig_20150928_002000;  
BaseM(~isnan(BaseM))=1;  
BaseM(isnan(BaseM))=0;  
Codi .mat 5.11 Obtenció de la matriu simplificada BaseM.
```

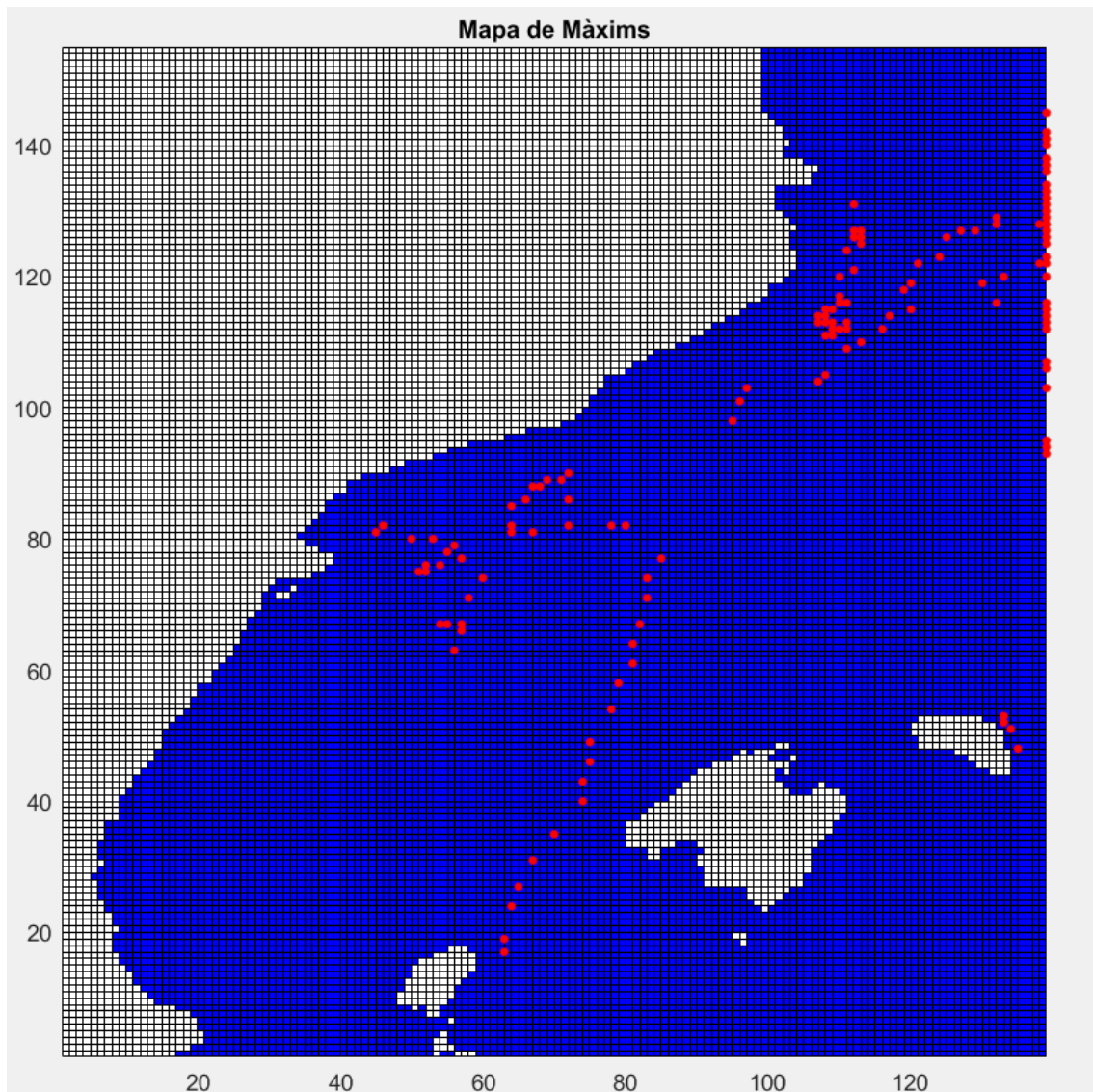
El resultat és la matriu *BaseM*, que serà la base de treball per a situar els màxims. Gràcies a la matriu de màxims *MaxMatrix* tota la informació que es busca es troba ordenada i llesta per a ser intersecada amb la Matriu Base. Mitjançant un *loop* que comença amb *i=72* (29/09/15 00:00) es va introduint cada posició i les identifica com a 2:

```
for i=72:Ndies*Nmatruius
    BaseM(MaxMatrix(72:i,1),MaxMatrix(72:i,2))=2;
end
```

**Codi .mat 5.12** *Loop d'intersecció de Matruius.*

Per a obtenir els resultats de manera visual es fa un simple plot *pcolor()* però ara amb només tres colors: blanc [1 1 1], blau [0 0 1] i roig [1 0 0] que representen els únics tres valors que té la matriu (0,1,2) respectivament:

```
pcolor(BaseM);
map=[1 1 1; 0 0 1; 1 0 0];
colormap(map);
Codi .mat 5.13 Plot de la localització dels màxims.
```



**Figura 5.9** Mapa de tots els màxims d' $H_s > 2m$  cada 20 min. 29/09/15-01/10/15.

Abans i tot de realitzar algun seguiment entre els punts es pot veure com els màxims que s'han representat paral·lelament al llarg de la costa de Catalunya i els que es troben entre València i les Illes Balears segueixen una certa linealitat. En l'apartat 4 s'ha mencionat que aquest va ser un temporal de Llevant, si a aquest se li afegeixen fluxos provinents de l'interior i del Sud de la península Ibèrica (l'anticicló europeu no permetia l'entrada de vents del Nord d'Àfrica), es va poder formar un centre de vorticitat a les Illes i els grans mòduls de velocitat exteriors es van localitzar al llarg del litoral català.

D'altra banda, també es pot apreciar la gran acumulació d'onatges a la Costa Brava. La seva correspondència amb el màxim absolut (5,56 m) trobat a la figura 5.8 indica que probablement moltes d'aquestes alçades es trobaven per sobre dels 5 m. Mirant aquest mapa es pot dir que en aquelles costes es va patir la part més intensa del temporal.

#### 5.4.4 Evolució dels màxims en el temps

La distribució en l'espai de tots aquests màxims obtinguts en la figura 5.9 aporta una bona imatge per determinar distribucions zonals, però si es vol fer un seguiment, la base està en determinar les posicions relatives de tots aquests punts en funció del temps.

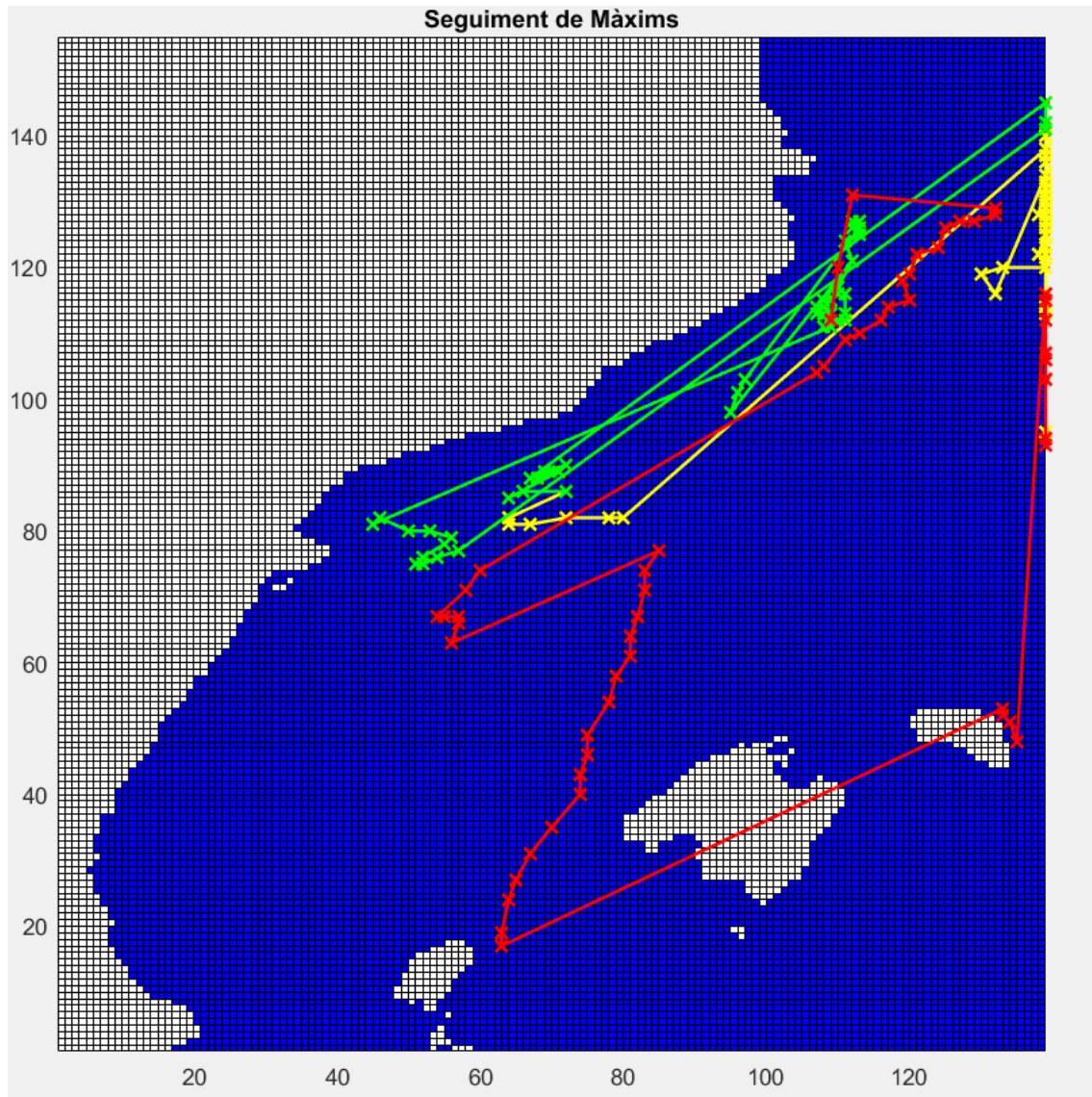
Gràcies al comandament *plot* es poden unir dos punts en una figura a partir de les seves coordenades. Mitjançant el *loop* anterior on es forma el Mapa de Màxims, es poden integrar totes les unions (representades en la línia *plot*) en una figura que es va dibuixant a sobre mitjançant l'enllaç *hold on*.

```
for i=72:Ndies*Nmatrins
    BaseM(MaxMatrix(i,1),MaxMatrix(i,2))=2;
    figure=pcolor(BaseM);
    colormap([1, 1, 1; 0, 0, 1; 1, 0, 0])
    title(['Dia' num2str(fix(i/72)) ' / 4'])
    hold on
    plot(MaxMatrix(72:i,2),MaxMatrix(72:i,1),'-rx')
    %w = waitforbuttonpress;
    pause (0.05);
end
```

**Codi .mat 5.14** Figura pcolor de la unió dels màxims.

L'output d'aquesta operació és una figura amb progressió temporal que va marcant cada línia que separa dos màxims contigus en el temps. Per identificar els recorreguts que es van realitzar cada dia, s'ha separat el *loop* anterior en tres trossos i cadascun s'ha representat amb un color diferent: Groc el 29/09/15, Verd el 30/09/15 i Vermell el 01/10/15.





**Figura 5.10** Connexió de tots els punts en el temps. Els colors identifiquen el dia: Groc, 29/09/15; Verd, 30/09/15; Vermell, 01/10/15.

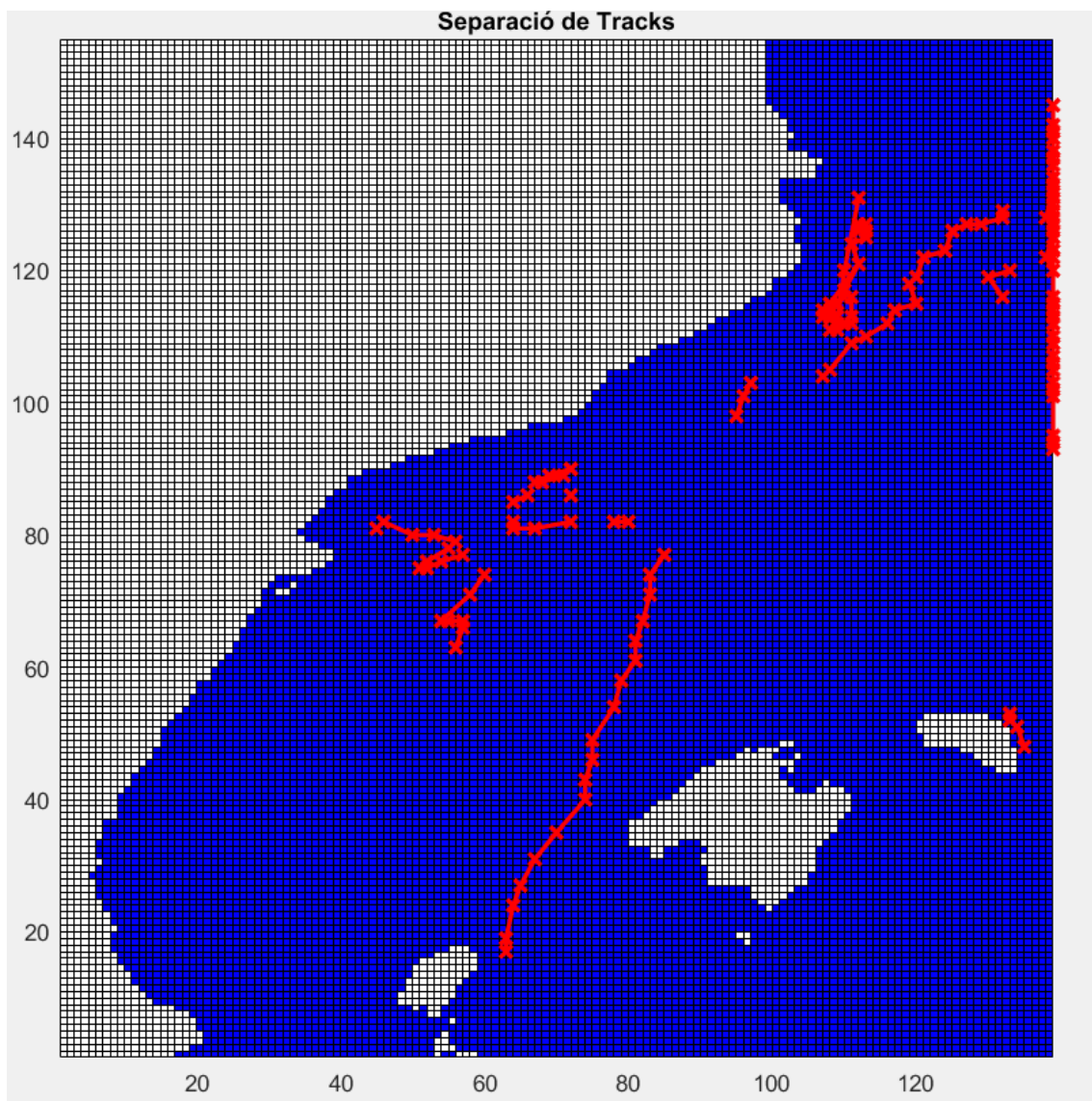
El problema d'aquest plot és que tots els màxims es troben connectats i per tant quan es dona un salt molt gran en el mapa, també queda registrat. Es pot veure que alguns màxims formen seguiments força continus amb separacions inferiors a 5 píxels (25 km), però aquests *tracks* més grans es troben separats per distàncies de centenars de kilòmetres. Això indica que conforme els màxims en un interval de temps s'anaven desplaçant en una direcció i perdent altura, en un altre lloc es generava un intens onatge que començava a prendre força fins que la seva primera altura màxima supera a l'alçada de l'últim màxim del *track* anterior.

Per a fer desaparèixer aquestes línies el que es pot fer és aplicar una tolerància a les distàncies que uneixen els punts coordinats. Calculant la distància euclidiana entre cada parell de punts contigus es poden desestimar les més grans. La tolerància que s'ha marcat és de 30 píxels (150 km).

Per a la formulació s'ha fet servir un vector d'indicadors *jumpind* que enregistra en quin pas es produeix el salt. Aquests passos es sumen al vector *blocks* on es formen intervals dels punts on les distàncies no fan canvis. Aquest interval de punts són introduïts directament al *loop* i representen tot el tram en bloc:

```
tol = 30;  
dl=diff([MaxMatrix(:,2);MaxMatrix(:,1)],1,2);  
euclid_dist = sqrt((dl(1,:).^2+dl(2,:)).^2);  
jumpind = [0 euclid_dist>tol];  
blocks = cumsum(jumpind);  
hold on  
for i=0:blocks(end)  
    plot(MaxMatrix((blocks==i),2),MaxMatrix((blocks==i),1),'-rx')  
    hold on  
end
```

**Codi .mat 5.15** Aplicació del filtre en el seguiment d'ones

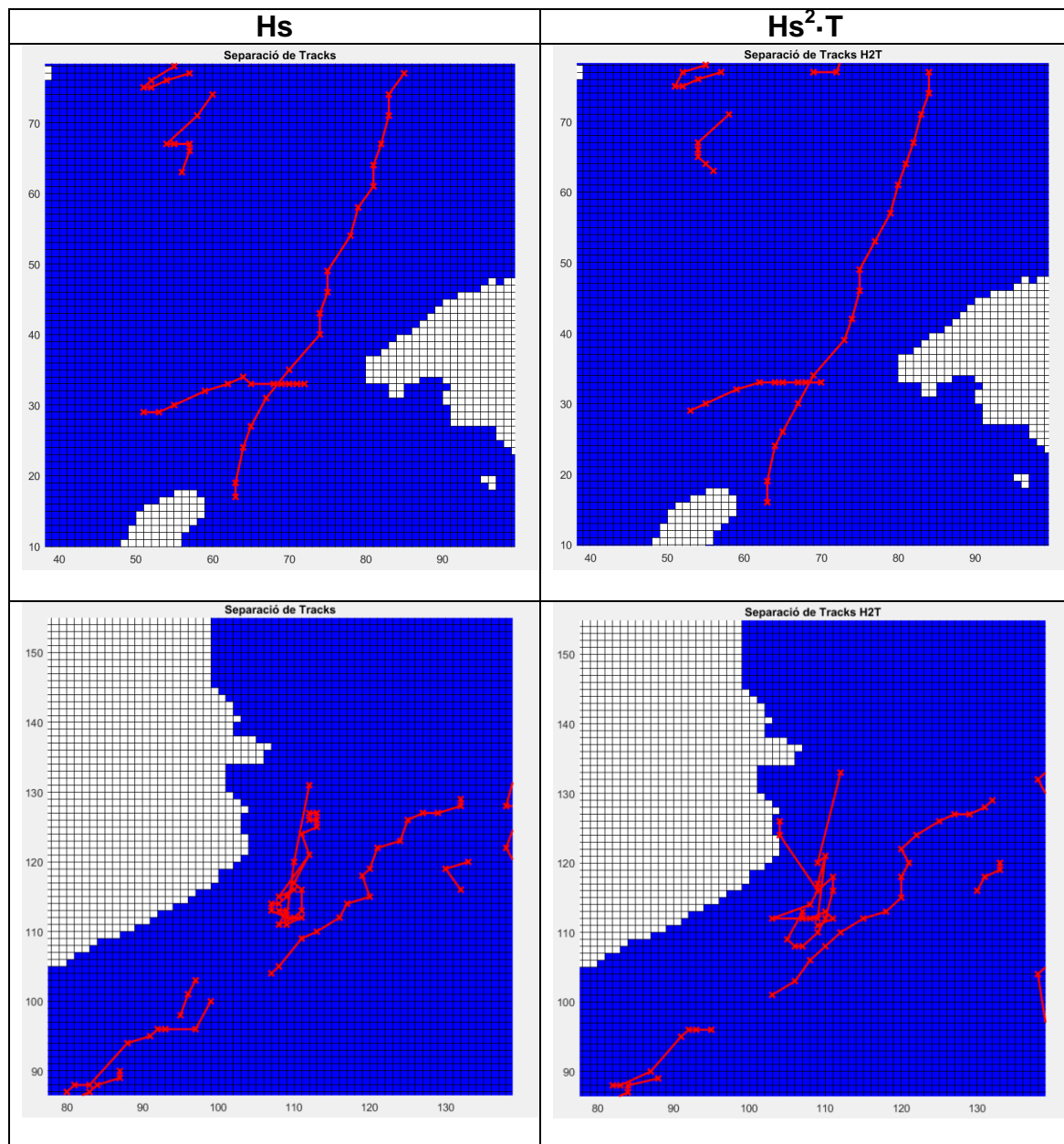


**Figura 5.11** Separació de Tracks quan s'ha aplicat en filtre de tolerància.

### 5.4.5 Comparació d'altures d'ona amb flux d'energia

Habitualment es fan estudis d'onatges on la variable escollida és el flux d'energia en comptes de les altures màximes. Fins i tot, també es treballa amb la  $Hs^2$  per accentuar les diferències entre els màxims i la resta d'altures d'ona. En aquest treball on els resultats es mostren en format visual, comparar un mapa de màxims d' $Hs$  amb un d' $Hs^2$  no té cap utilitat perquè la localització espacial és la mateixa. El flux energètic en canvi, definit com a  $Hs^2 \cdot T$  sí que pot presentar resultats diferents. L'alçada d'ona i el període són variables amb un alt coeficient de correlació durant temporals de mar, tal com es descriu en Lin-Ye et al., 2016.

Utilitzant els mateixos passos anteriors, tenint en compte que s'ha de modificar la funció de màxims *maxLoc* i modificar l'entrada d'arxius per afegir les dades dels períodes d'ona en cada moment, s'ha realitzat el mateix plot de separació de *tracks*.



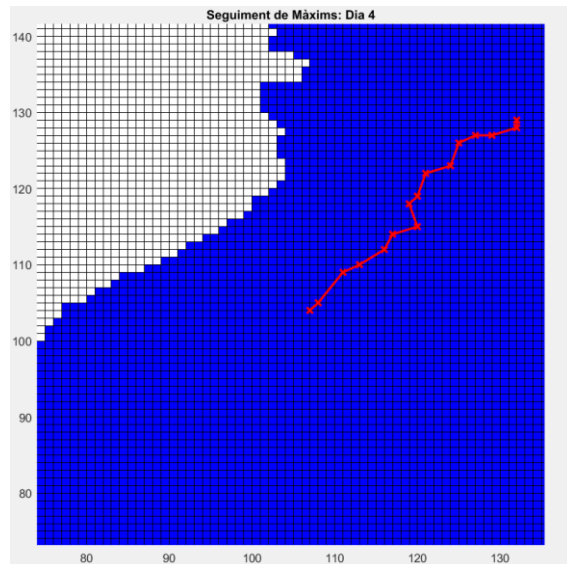
**Taula 5.1** Comparativa de les rutes amb altures màximes i flux d'energia a les Illes Balears i a la Costa Brava.

No és un canvi significatiu però aquesta taula mostra com en alguns casos, les rutes s'han suavitzat amb un patró més rectilini eliminant o substituint punts que donaven aquestes trajectòries sinusoïdals. Tot i això és d'esperar uns resultats molts similars donat que les altures més altes normalment estan associades als períodes més grans i per tant el flux segueix sent el major.

## 5.5 ALGORITME DE CERCA I SEGUIMENT

La identificació de les rutes separades de màxims permeten distingir camins més definits que un mapa de màxims dispersos. A partir d'aquí però és planteja la qüestió sobre què passa amb els punts finals de les rutes. És evident que les ones de més de 2 m (el llindar que marca una tempesta) no acaben allí, sobretot en rutes que uneixen punts on tots els valors són propers als 5 m. L'objectiu ara és fer una cerca de les altures d'ona que es formen en les proximitats del final d'algun d'aquests trams de tal manera que es mostri l'evolució que ha tingut el mar quan aquests van avançant paral·lelament als recorreguts que s'han descrit fins ara.

**Figura 5.12** El tram elegit per continuar aquest exercici és el que es va formar el dia 1 d'octubre entre les 01:20 i les 6:20 de la matinada. Aquest camí està situat a l'Est de la Costa Brava i es descriu en direcció Sud-Oest. S'ha escollit aquest tram perquè seguint en aquesta direcció hi ha molt espai per identificar un bon *track*, que és la direcció previsible que seguiran els màxims locals. L'únic problema és que els següents trossos de màxims es troben força lluny d'aquest final i s'haurà de construir un *track* ben llarg si es vol arribar a aquests punts del Sud-Oest.



Una volta que s'ha identificat el primer punt, de coordenades  $(x,y)=(104,107)$  trobat a les 6:20, es crea un menor dintre la següent matriu en el temps centrada en  $(x,y)$ . Les dimensions d'aquest menor venen determinades per un paràmetre  $m$  que marca quantes files i columnes es formen al voltant del centre (la mida del menor quadrat és de  $(2m+1) \times (2m+1)$ ). El càlcul de qualsevol d'aquests menors s'expressa amb  $A((x-m):(x+m),(y-m):(y+m))$  on  $A$  és la matriu de la que s'extreu. Seguidament s'aplica la funció *maxLoc* per a trobar el punt més alt dintre d'aquest menor i s'identifiquen les coordenades en la matriu gran. Finalment es carga la següent matriu en el temps, s'afegeix el nou punt i és torna a repetir el procés tal com mostra el següent codi:

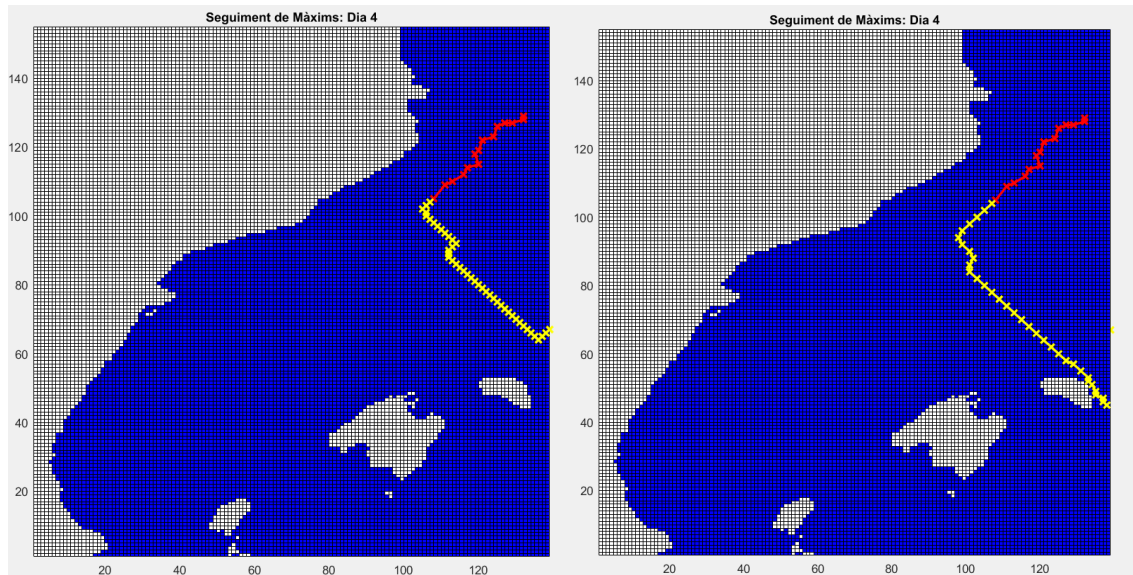
```
Track = zeros(Nmatrius-a, 3)

for i=a:Nmatrius
    SubMatrix=Hsig.d.(Matriu{i})((x-m):(x+m),(y-m):(y+m));
    [Max,X,Y]=maxLoc(SubMatrix);
    x=x-(m+1)+X;
    y=y-(m+1)+Y;
    Track(i-(a-1),1)=Max;
    Track(i-(a-1),2)=x;
    Track(i-(a-1),3)=y;
end
```

**Codi .mat 5.16** *Algoritme de cerca i seguiment.*

El resultat d'aquest procés és l'element *Track* que té la mateixa estructura que la matriu *MaxMatrix* però ara per als elements d'aquest recorregut. El paràmetre *a* indica quina és la posició que ocupa el màxim de les 6:20 en el temps que és el valor a partir del qual s'inicia el *loop*. En aquest cas és el número 19 del dia 1 d'octubre. El valor final no és pot saber a priori perquè pot ser que el traçat de punts arribi fins a l'extrem de la malla i no pugui continuar buscant menors, o perquè s'han acabat les dades del SWAN (al final del 01/10/15 ja no hi ha més resultats).

En el moment de plotejar els resultats, s'han obtingut diferents trajectòries segons l'àrea en que es treballa. No s'han utilitzat valors de *m* més grans de 4 perquè no té sentit enllaçar zones tan grans en un recorregut d'ones(per a *m*=5 els menors són de 11 x 11 que són quadrats de 55 km de costat). En malles petites (*m*=1,2) els plots són molt similars:

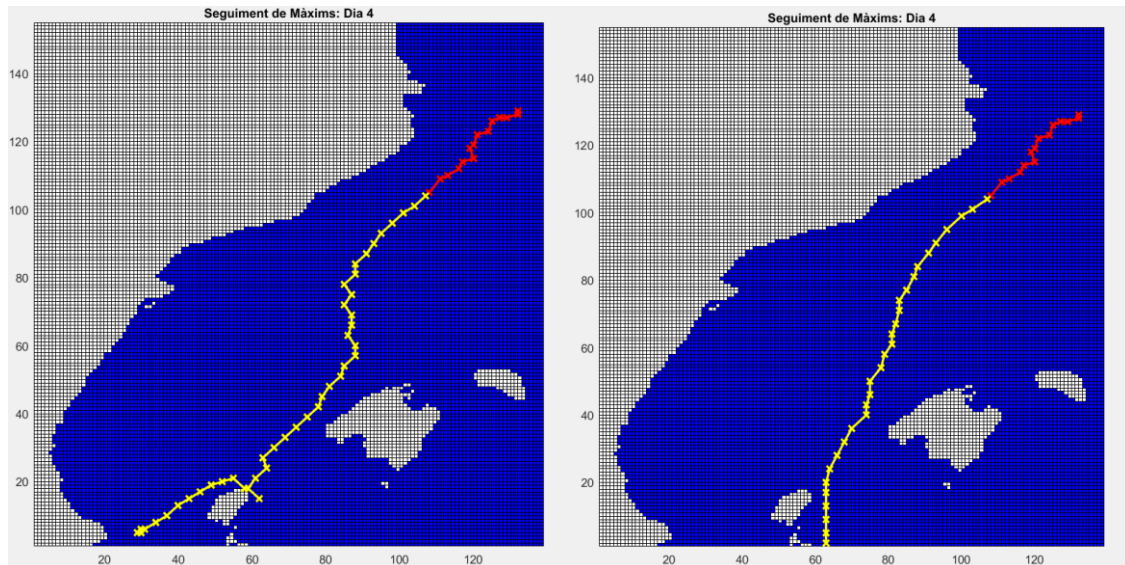


**Figura 5.13** *Track amb cerca de 15 x 15 km(imatge esquerra) i 25 x 25 km(imatge dreta). 01/10/15.*

Es pot veure que amb aquestes resolucions més petites, els màxims avancen cap al Sud-Est i es troben amb el marge Est de la malla, resultant en un intent fallit la unió amb els següents trams. A més a més, pel que fa a les alçades d'ona, els dos plots tenen una tendència a la baixa, de tal manera que quan arriben a l'extrem es registren altures inferiors a 3 m.

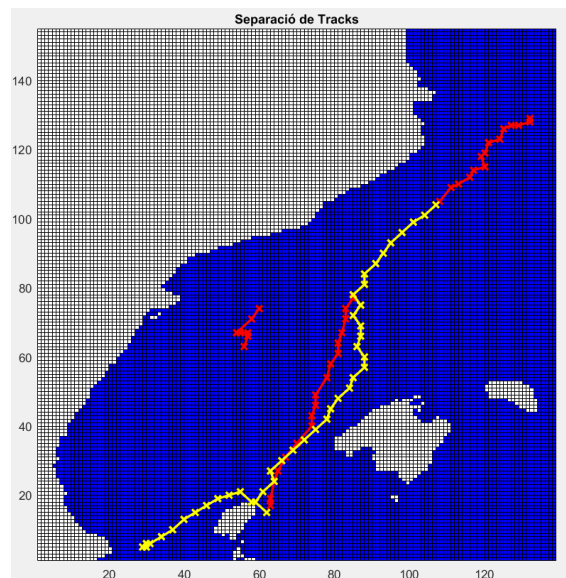


Tot i la semblança d'aquests tracks anteriors, conforme es va augmentant el radi de recerca augmenten les diferències entre els plots. El canvi entre  $m=2$  i  $m=3$  és molt brusc i modifica completament la direccionalitat com es pot veure en la representació de  $m=3$  i  $m=4$ :



**Figura 5.14** Track amb cerca de 35 x 35 km(imatge esquerra) i 45 x 45 km(imatge dreta). 01/10/15.

Els seguiments espacials també segueixen una línia en direcció Sud però aquesta vegada avancen en direcció Eivissa, uns resultats amb més coherència que els anteriors. Quan arriben a la illa, es veu una bifurcació que s'ha detectat amb resolucions diferents. Per tancar aquest capítol s'ha agafat el track definit amb  $m=3$  i s'ha superposat amb la figura 5.11 per demostrar que s'ajusta bastant bé amb el temporal:



**Figura 5.15** Superposició del Track 35 x 35 km amb el Temporal. 01/10/15.

Amb aquestes representacions finals queda registrada l'aplicació de l'algorisme de rastreig d'ones que s'ha marcat com a objectiu. El primer algorisme que es prova en el Mediterrani.



## 6. DISCUSSIÓ DE RESULTATS

S'han presentat les bases de dades, els models de computació d'ones, els blocs de registres que conformen el temporal del setembre de 2015, el tractament d'aquests resultats, un arxiu que permet identificar tots els màxims del temporal i establir un patró de seguiment en el temps i per últim, un algoritme de seguiment i rastreig que avança identificant tots els màxims de manera zonal.

Per realitzar un anàlisi dels resultats primer es parlarà de la procedència de les bases obtingudes i comprovar si han sigut coherents per a la tasca descrita i seguidament es discutirà sobre els resultats numèrics i gràfics fent servir els plots obtinguts com a punt de referència.

### 6.1 CONSISTÈNCIA DE LES DADES

Es pot comprovar que en totes les representacions de les diverses matrius que s'han mostrat, s'aprecia perfectament la distribució espacial de la costa de tal manera que es pot fer una identificació ràpida de les zones que s'estan tractant en cada moment. No és un contorn suficientment definit per a poder distingir platges específiques i altres unitats costaneres (com cales o penyes) però sí que es pot veure per exemple el Cap de Creus o el Delta de l'Ebre. Això es gràcies a la densitat de la malla en la que s'ha treballat que és prou bona per obtenir resultats en les escales que s'han mostrat.

Pel que fa a les altures d'ona de cada matriu s'ha de destacar que aquestes no presenten discontinuïtats brusques i per tant, ofereixen un estat del mar consistent amb la realitat. Els plots obtinguts presenten distribucions a color amb contorns suaus. Les diferències en altura de dos valors contigus dins de la xarxa són inferiors a 1 cm quan es troben dintre d'una partició del mar amb calma. Quan s'aproxima el front d'ona, aquests desnivells poden rondar el valor de 20 cm. També en punts pròxims de la costa les diferències es troben entre 10-20 cm. Cosa que s'explica per les variacions en la batimetria, que són més brusques conforme es va aproximant a terra. En la figura 6.1 es poden apreciar aquestes diferències en punts pròxims a la costa, i un relleu més homogeni en punts *offshore*. S'ha escollit el delta del Llobregat durant el dia 30 per a la representació:

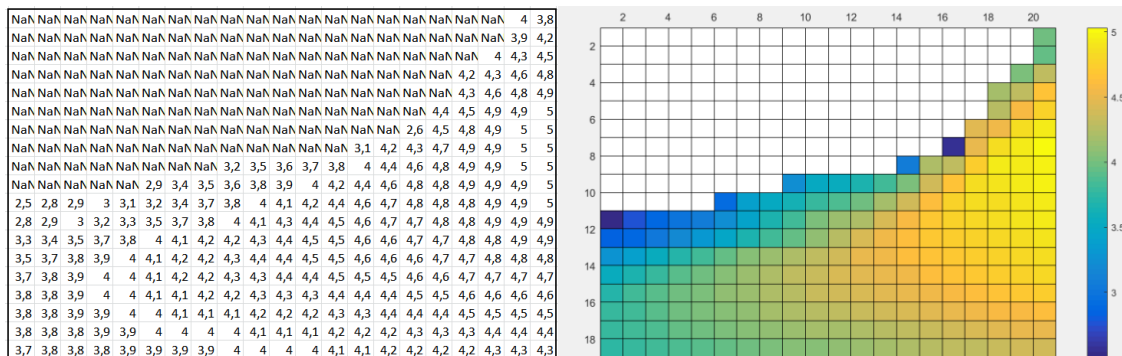
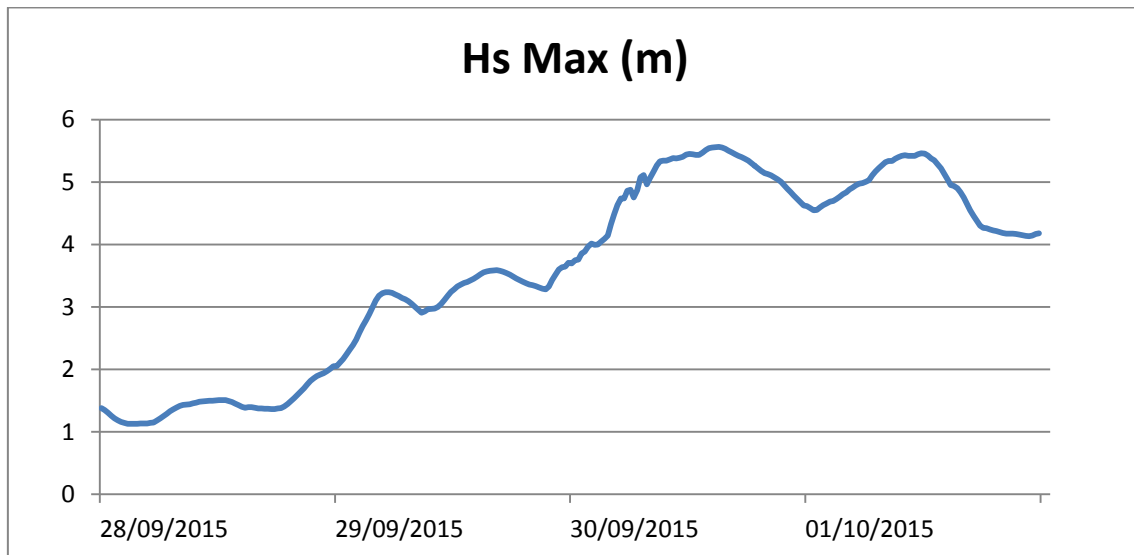


Figura 6.1 Representació de les altures d'ona al Llobregat el dia 30/09/15 a les 13:00. Escales en metres.

Les divisions temporals en les que es prenen els resultats del model SWAN marquen la densitat de dades que s'han obtingut en aquests quatre dies. Les 288 mostres que s'han obtingut determinen la localització dels 288 màxims que han sigut plantejats amb trajectòries definides. Amb intervals de 20 min es pot afirmar que la resolució és prou bona per dibuixar els recorreguts amb l'escala en que es treballa, però potser per a poder identificar trajectòries en zones determinades com per exemple a la Costa Brava, on hi ha tanta concurrència de màxims, es necessitaria períodes d'entre 5-10 min. Tot i això en alguns casos hi ha màxims que mantenen la seva posició passats 20 min però aquí també intervé la resolució espacial.

Un punt negatiu de la modelització SWAN ha sigut que durant el dia 29, el front d'ones es va sortir de la zona mallada i per tant no s'han pogut caracteritzar bé els màxims d'aquest dia. Tot i que s'ha triat aquest sector per realitzar un *tracking* més pròxim a la costa catalana s'ha de tenir en compte que hi ha hagut una pèrdua significativa d'informació, almenys en els valors dels màxims durant aquest dia que dóna una corba errònia de les Hs més altes en funció del temps (figura 6.2).



**Figura 6.2** Representació de les Hs màximes durant el tempra. Plot d'excel. Escala amb metres.

Cal destacar que aquest gràfic no ofereix cap resultat tangible perquè les corbes Hs-Temps s'han de realitzar en un mateix punt, sinó no tenen massa sentit. Però el plot ens serveix per a veure com el dia 29 s'interromp aquesta tendència creixent en les altures d'ona i passen a estar compreses en un interval de 3 a 3,5 m quan podrien superar els 4 m. En la distribució espacial ja s'ha vist que els màxims queden pegats a la franja Est durant aquest dia. Tot i això, la resta de resultats han mostrat plots coherents i per tant, aptes per a realitzar un bon seguiment.

## 6.2 PROCEDIMENT I RESULTATS

Primerament s'ha de matisar que durant el tractament de dades s'ha definit l'altura llindar a partir de la qual iniciar el seguiment de màxims per tal de definir recorreguts amb coherència per identificar patrons en situacions de tempesta. Per aquest motiu, tots els màxims que es corresponen al primer dia no s'han considerat en

les representacions de seguiments però tampoc representen una pèrdua important en termes espacials. Tenint en compte que el primer front d'ones per s'ha desenvolupat ben lluny de la costa (figura 5.2) aquests màxims es troben completament deslocalitzats pel sud de Mallorca i al voltant de Menorca.. A part d'això, per la gran quantitat d'ones que s'han sortit per l'Est durant el dia 29 s'ha decidit buscar un punt per aplicar l'algoritme de cerca a partir del dia 30. Durant els dos dies que resten de tempesta hi ha molts trams que poden resultar susceptibles per a fer un bon seguiment i probablement donarien resultats interessants, però s'ha escollit el que comença a les 6:20 de l'1 d'octubre per donar una referència visual més bona.

També s'ha de destacar que les altures que s'han utilitzat no són les màximes en cada moment sinó les altures significants. Es per això que no s'estan seguint els pics pròpiament però com aquest és un exercici espacial, els valors no importen sempre i quan recorrin el mateix camí.

Uns resultats molt bons que han aparegut quan s'està caracteritzant la tempesta, són els que s'han trobat a l'interior del mar en la zona del Cap de Creus. Tot i que el seguiment en aquest sector no és senzill, sí que es pot apreciar una gran concentració de màxims amb les altures d'ona més altes que es van prendre durant tot el temporal (el màxim absolut també es troba aquí). Aquests resultats són consistents amb tots els reculls de premsa que s'han vist, on s'especificava que les ones més fortes van impactar el Nord de Catalunya produint greus danys a la infraestructura. En un fragment de l'article ofert pel diari *elpuntavui.cat* es parlava d'ones d'entre 5 i 6 m que arribaven a la costa el dia 30, una afirmació que també es consistent amb l'altura més alta de  $H_s$  que es va aproximar als 5,5 m. Es per això que en aquest espai de temps, el front d'ones que s'ha obtingut es consistent amb les conseqüències produïdes en les platges de Cadaqués i Lloret.

També s'ha de destacar la gran quantitat de màxims que s'ha format al llarg de tota la costa catalana. Tal com s'ha especulat, l'acció concomitant dels dos fluxos de vents del Nord-Est i del Sud-Est va formar un centre de vorticitat a sobre les Illes Balears. Una afirmació que es correspon perfectament amb la figura 4.4 on es veu que el dia 30 un centre de baixes pressions es va localitzar justament a sobre de les Illes provocant ratxes de vent molt fortes. Les altes velocitats que es van generar al voltant del vòrtex coincideixen amb la localització dels registres de màxims a la costa.

Pel que fa als resultats que s'han obtingut de l'algoritme de cerca s'ha de dir que en termes generals han sigut adequats per al procés que es buscava representar. Partint de la hipòtesi que a partir de les 6:20 qualsevol *tracking* hauria d'avançar en direcció sud, tots els plots han coincidit. El principal problema que s'ha detectat però, és que aquest algoritme potser és massa sensible als canvis de mida dels menors que s'utilitzen de recerca. No hi ha dubte que imposant unes condicions d'aquestes característiques sempre es formarà un recorregut de punts, la qüestió es determinar quin d'aquests pot ser més fiable. En aquest cas

És possible que la solució es trobi en anar modificant la mida dels menors de forma gradual de manera que interpreti altures màximes més pròximes a les que formen l'anterior recorregut.

## 7. SUMARI

---

S'ha demostrat que el Mediterrani és una regió capaç de produir fortes tempestes que venen condicionades per agents meteorològics molt devastadors. La complexa distribució entre terra i mar i aquesta orografia única que es troba a Catalunya provoca la formació de molts fenòmens a nivell local que modifiquen aquest clima del Mediterrani que ja de per sí és un sistema peculiar i característic.

S'han presentat i analitzat diversos patrons climatològics a l'Atlàntic europeu i al Mediterrani que condicionen el comportament de les tempestes, i s'ha pogut comprovar com situacions tan aleatòries i espontànies que són els ciclons poden establir rutes estacionals mitjanen força definides. Aquestes trajectòries no marquen ni molt menys els camins que seguiran tots aquests esdeveniments però sí que indiquen una tendència, un comportament regular que es trasllada a tot els fenòmens associats a una tempesta: com els vents, les precipitacions o els onatges. D'aquesta manera es pot afirmar que la meteorologia té un comportament que es pot quantificar matemàticament o amb models de càlcul. L'ús d'algoritmes de seguiment en enormes bases de dades s'ha exemplificat amb resultats molt coherents que han servit per a aportar idees en aquest procediment. Amb aquesta teoria també s'han pogut aplicar models de computació de variables que permeten establir resultats mallats en distribucions espacials homogènies, gràcies als quals s'ha pogut continuar amb anàlisis més extensos i detallats.

Les característiques meteorològiques i oceanogràfiques que es donen a la costa catalana no han sigut fàcils d'exposar donat que quan s'està parlant de pautes climàtiques al llarg de tot el litoral s'ha vist que es descriuen diferents comportaments en diversos sectors. Després de comparar les distàncies de *fetch* que es corresponen amb els recorreguts de les ones que arriben a Catalunya, en aquesta zona limitada per les Illes Balears, Còrcega i Sardenya, s'ha demostrat que les ones més altes tendeixen arribar al Delta de l'Ebre, cosa que es correspon amb dades de la XIOM. En canvi, pel que fa a les situacions extremes s'han obtingut altures més altes a la part Nord de Catalunya on curiosament ha coincidit també amb els resultats obtinguts del cas particular que s'ha exposat a continuació.

Torrencial és la paraula que descriu millor aquesta regió quan ens trobem davant d'una zona on predominen els períodes de calma o d'estat normal del mar i que en un interval relativament curt de temps es passa d'aquesta situació a unes condicions extremes. Així va ser quan el dia 28 de setembre del 2015 el centre Anticiclònic es va assentar sobre el Nord d'Europa i va propiciar l'entrada de baixes pressions i aire fred a la península Ibèrica. El resultat, una tempesta que es va formar sobre la part occidental del Mediterrani i que va durar més de tres dies afectant gran part de la Costa Catalana amb ones d'entre 5 i 6 m que van arribar al sector del Nord. Les conseqüències, grans danys a les infraestructures costaneres, vaixells destruïts i víctimes mortals.

L'execució de les tècniques computacionals que s'han mostrat durant la metodologia han resultat en una representació interessant i curiosa com no es veu habitualment sobre una tempesta. Sempre resulta més comprensible un tractament gràfic sobre qualsevol esdeveniment i això és el que s'ha buscat: la caracterització d'un temporal a través d'un seguiment espacial dels pics que es formen al mar en cada moment. Es pot debatre que el procediment descrit sigui l'adequat o que directament hi hagi errors en la interpretació dels resultats, però està clar al menys s'ha donat a entendre el que es volia aconseguir amb una descripció pas a pas de tot l'exercici, i els plots són els exemples d'aquest èxit.

Finalment, s'ha presentat l'algoritme que s'havia plantejat com a tasca del TFG, o al menys la idea que s'ha concebut per realitzar aquest rastreig i seguiment d'ones. S'ha posat a prova amb diferents resolucions i s'han presentat els resultats diversos a partir dels quals s'ha identificat la seva correspondència amb el temporal.

## 8. CONCLUSIONS

---

La trajectòria seguida pel temporal del 28/09/15-01/10/15 és clarament no contínua en el temps. Es poden identificar diferents camins preferents, formats per màxims d'alçades significants d'ona, que no necessàriament es troben connectats i es poden donar salts bruscs de centenars de kilòmetres.

El mètode emprat en la representació del temporal mitjançant la identificació i unió dels recorreguts de màxims pot no correspondre's amb la realitat. S'ha demostrat que aquests camins prenen múltiples trajectòries amb màxims secundaris que han sigut identificats mes tard per l'algoritme de cerca.

La cerca de màxims per distàncies en el temps provoca unes trajectòries coherents amb els patrons de vent observats. Així com també en els punts de la costa on s'ha detectat un onatge intens associat a una aglomeració d'aquests màxims.

En l'algoritme de cerca i seguiment, l'àrea on es troba màxim local resulta fonamental en la definició de la trajectòria. A mesura que augmenta, la trajectòria s'ajusta millor al recorregut de màxims però aquesta es forma de la unió de punts que es troben més separats. El seguiment de màxims no resulta homogeni ja que totes les trajectòries s'han format d'alçades variables.

Per avançar amb el coneixement en aquest camp es proposen unes línies futures que s'han plantejat per millorar els resultats:

- (i) En l'algoritme de cerca: realitzar un seguiment amb menors que fossin variables en el temps per trobar altures similars a les anteriors per tal de millorar la homogeneïtat en el recorregut i no encadenar pics diferents.
- (ii) En el tractament de la tempesta: tenir en compte totes les variables obtingudes pel model SWAN ( $H, T, H^2 \cdot T$ ) i la direcció de l'onatge i incloure l'espectre d'energia en els resultats per tal de determinar patrons homogenis.
- (iii) Realitzar un estudi més exhaustiu a nivell meteorològic i identificar direccionalitats i velocitats de vents ( $v, \theta$ ) per a una comparació més bona amb les representacions.



## 9. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

---

- Articles

Adger WN, Hughes TP, Folke C, Carpenter SR, Rockström J, 2005. *Social-ecological resilience to coastal disasters*.

Bolaños, R., Rotes, A., Sanchez-Arcilla, A., 2005. Spectral wave climate at northern Spain's Mediterranean coast. *The Fifth International Symposium on Ocean wave measurement and analysis*, Madrid, Spain 3rd–7th July 2005.

Bolaños, R., Sánchez-Arcilla, A., Cateura, J., 2007. *Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modelling in the NW Mediterranean*. *Journal of Marine Systems* 65, 336–353.

Bolaños, R., Jorda, G., Cateura, J., Lopez, J., Puigdefabregas, J., Gomez, J., Espino, M., 2008, *The XIOM: 20 years of a regional coastal observatory in the Spanish Catalan coast*.

Cateura, J., Sánchez-Arcilla, A., Bolaños, R., Sairouni, A., 2004: *Atmospheric conditions during severe wave storms in the North-Western Mediterranean. Generation, evolution, decay and implications*, 37th CIESM Congress, Barcelona, Spain.

Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. *A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation*. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4): 7649-7666.

Gomez, M. and Carretero, J.C., 2005. *Wave forecasting at the Spanish coasts*. *Journal of Atmospheric and Ocean Science*, 10(4): 389-405.

Gracia, V., Garcia-Leon, M., Sanchez-arcilla, A., Gault, J., Oller, P., Fernández, J., Sairouni, A., Cristofori, E. and Toldrà, R., 2014. *A new generation of early warning systems for coastal risk: the iCoast project*, *International Conference on Coastal Engineering*, pp. 1-8.

Gracia, V., Garcia, M., Grifoll, M. and Sanchez-Arcilla, A., 2013. *Breaching of a barrier under extreme events. The role of morphodynamic simulations*. *Journal of Coastal Research*, 65: 951-956.

Guillen, J., 2008. *Els Riscos Litorals a Catalunya (RISKCAT)*, CSIC.

Hasselmann, S; Hasselmann, K; Janssen, P A E M; Bauer, E; Komen, G J; Bertotti, L; Lionello, P; Guillaume, A; Cardone, V C; Greenwood, J A, 1988: *The WAM model - A third generation ocean wave prediction model*". *Journal of Physical Oceanography*.

Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., H Dette, H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., Spanhoff, R., 2002. *Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview.*

Hurrell, J.W. and Deser, C., 2009. North Atlantic climate variability: *The role of the North Atlantic Oscillation. Journal of Marine Systems*, 78(1): 28 - 41.

IPCC, 2014. Summary for Policymakers. In: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea and L.L. White (Editors), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA*, pp. 1-32-.

Jansà, A., Alpert, P., Buzzi, A., & Arbogast, P. (2001a). *MEDEX, cyclones that produce high impact weather in the Mediterranean*

Jiménez, J., Valdemoro, H., Gracia, V., Nieto, F., A. Sánchez-Arcilla, 1997. *Processes reshaping the Ebro Delta.*

Jiménez, J., Valdemoro, H., Gracia, Solé, H., Ariza, E., Mendoza, T., Sánchez-Arcilla, A., 2008. *Estat de la Zona Costanera a Catalunya.*

Lin-Ye, J., Garcia-Leon, M., Gracia, V. and Sanchez-Arcilla, A., 2016. A multivariate statistical model of extreme events: *An application to the Catalan coast. Coastal Engineering*, 117: 138 - 156.

Lionello, P., Bhend, J., Buzzi, A., Della-Marta, P.M., Krichak, S.O., Jansà, A., Maheras, P., Sanna A., Trigo I.F., Trigo, R., 2006. *Cyclones in the Mediterranean Region: Climatology and Effects on the Enviroment.*

Lozano I., Devoy, R.J.N., May, Andersen W.U., 2004. *Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario. Marine Geology* 210 (2004) 205-225.

Mendoza, E., Jiménez, J., Mateo, J., 2011. *A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean).*

Pallares, E., Sanchez-Arcilla, A. and Espino, M., 2014. *Wave energy balance in wave models (SWAN) for semi-enclosed domains--application to the Catalan coast. Continental Shelf Research*, 87: 41-53.

Sánchez-Arcilla, A., González-Marco, D., Bolaños, R., 2008. *A review of wave climate and prediction along the Spanish Mediterranean coast.*

Sánchez-Arcilla, A., Garcia-Leon, M. and Gracia, V., 2014. *Hydro-morphodynamic modelling in Mediterranean storms - errors and uncertainties under sharp gradients. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14: 2993-3004.

Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., Gracia, V., Devoy, R., Stanica, A. and Gault, J., 2016. *Managing coastal environments under climate change: Pathways to adaptation. Science of The Total Environment*: -.

Trigo, I. F., Davies, T. D., & Bigg, G. R., 1999. *Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region*. J. Climate, WAMDI Group, S.H., Hasselmann, K.

Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V.C., Greenwood, J.A., Reistad, M., Zambresky, L. and Ewing, J.A., 1988. *The WAM model: a third-generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography*, 18: 1775-1810.

Wallace, J. M., Lim, G., & Blackmon, M. L. (1988). *Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic waveguides*.

- Webs

Puertos del Estado, Sèries Simar(1958-2016). Espanya.  
[http://calipso.puertos.es//BD/informes/INT\\_8.pdf](http://calipso.puertos.es//BD/informes/INT_8.pdf)

Generalitat de Catalunya. Comunicat de prealerta, Protecció Civil.  
<http://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2015/06/08111706/Butllet%C3%AD-setembre15.pdf>

Generalitat de Catalunya, Premsa Gencat  
[http://premsa.gencat.cat/pres\\_fsvp/AppJava/notapremsavw/288127/ca/balanc-llevantada-tardor.do](http://premsa.gencat.cat/pres_fsvp/AppJava/notapremsavw/288127/ca/balanc-llevantada-tardor.do)

Generalitat de Catalunya. Servei Meteorològic de Catalunya.  
<http://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2015/06/08111706/Butllet%C3%AD-setembre15.pdf>

ECMWF. Climate reanalysis  
<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis>

El Periódico.  
<http://www.elperiodico.cat/ca/noticias/temps/parat-tren-lestacio-reus-per-pedres-via-per-tempesta-4548786>

El punt avui.  
<http://www.elpuntavui.cat/territori/article/11-mediambient/901307-llevantada-alarman-als-griells-de-lestartit.html>

Meteocod. Anàlisi dels principals episodis meteorològics.  
<http://codinameteor.blogspot.com.es/2015/10/llevantada-al-baix-camp-i-lemporda-29.html>

Research Data Archive. NCEP/NCAR, Global Reanalysis Products, 1948-continuing  
<http://rda.ucar.edu/datasets/ds090.0/>

